



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

DISEÑO DEL SISTEMA DE EVACUACIÓN DE AGUAS DEPURADAS DE LA E.D.A.R. DE LA LAGUNA DE “LOS PATOS” EN CUMANÁ (VENEZUELA)

Realizado por:

Kalinov Koev, Nikola

Dirigido por:

Álvarez Díaz, Cesar

García Gómez, Andrés

Para la titulación:

Grado en Ingeniería Civil

Santander, septiembre 2020

TRABAJO FIN DE GRADO

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 6 |
| 2. OBJETIVOS | 11 |
| 3. DATOS DE PARTIDA | 12 |
| 3.1. Topografía | 12 |
| 3.2. Batimetría | 12 |
| 3.3. Nivel del mar | 13 |
| 3.4. Salinidad, temperatura y densidad del agua del mar | 14 |
| 3.5. Viento y temperatura del aire | 15 |
| 3.6. Vertido de la EDAR | 17 |
| 3.7. Población actual y futura | 17 |
| 3.8. Caudales de aguas residuales | 18 |
| 3.9. Carga contaminante | 19 |
| 3.10. Red de saneamiento y EDAR | 19 |
| 3.11. Normativa aplicable | 20 |
| 3.12. Zona de estudio | 21 |
| 4. DISEÑO AMBIENTAL | 22 |
| 4.1. Metodología | 22 |
| 4.2. Dilución inicial | 23 |
| 4.2.1. Introducción | 23 |
| 4.2.2. Metodología | 24 |
| 4.2.3. Formulaciones de Roberts año 2004-2006 | 25 |
| 4.2.4. Cálculo de la dilución en continuo | 28 |
| 4.2.5. Metodología para el acople del modelo dilución inicial con el análisis de la evolución del vertido | 29 |
| 4.3. Hidrodinámica marina | 31 |
| 4.3.1. Introducción | 31 |
| 4.3.2. Metodología | 31 |
| 4.3.3. Descripción del modelo hidrodinámico Deflt3D | 31 |
| 4.3.4. Configuración del modelo Delft3D en la zona de estudio | 33 |
| 4.3.5. Resultados hidrodinámicos | 36 |
| 4.4. Estudio de la contaminación fecal | 38 |
| 4.4.4. Introducción | 38 |
| 4.4.5. Modelos de advección y dispersión | 39 |

| | | |
|----------|--|----|
| 4.4.6. | Metodología | 40 |
| 4.4.7. | Resultados del estudio de evolución de contaminación fecal | 42 |
| 5 | DISEÑO HIDRÁULICO | 45 |
| 5.1. | Introducción | 45 |
| 5.2. | Metodología | 46 |
| 5.2.1. | Cálculo de diámetro económico | 47 |
| 5.2.2. | Cálculo hidráulico | 47 |
| 5.3. | Dimensionamiento del emisario | 54 |
| 5.4. | Dimensionamiento de la estación de bombeo. | 58 |
| 5.4.1. | Cámara de aspiración | 59 |
| 5.4.2. | Cámara seca | 61 |
| 5.4.3. | Aliviadero de seguridad | 62 |
| 5.4.4. | Bombas y funcionamiento de la estación. | 63 |
| 6 | RESUMEN Y CONCLUSIÓN | 66 |
| 6.1 | Resumen | 66 |
| 6.2 | Conclusión | 68 |
| | APENDICE | 69 |

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Cargas del efluente de la EDAR Laguna de Los Patos..... | 17 |
| Tabla 2: Estimación de la evolución de población servida por el sistema de saneamiento. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del INE de 2014. | 18 |
| Tabla 3: Resumen de los caudales de diseño. | 18 |
| Tabla 4: Concentraciones medias estimadas en el agua residual bruta. | 19 |
| Tabla 5: Resumen de las características del tramo difusor. | 24 |
| Tabla 6: Características generales de las actuaciones. | 46 |
| Tabla 7: Rugosidades de diferentes tipos de material. | 49 |
| Tabla 8: Rugosidades adoptadas en los diferentes tramos del <i>bypass</i> | 50 |
| Tabla 9: Características de los tramos del emisario propuestos. | 54 |
| Tabla 10: Características del tramo difusor propuesto. | 54 |
| Tabla 11: Diámetros y velocidades (m/s) del flujo del emisario en los dos escenarios de cálculo considerados. | 55 |
| Tabla 12: Perdidas de carga. | 58 |
| Tabla 13: Valores orientativos del tiempo mínimo del ciclo de bombeo. | 59 |
| Tabla 14: Valores para el dimensionamiento de la cámara seca de la estación de bombeo. | 61 |
| Tabla 15: Caudales diseño de la estación de bombeo. | 65 |
| Tabla 16: Resultados de los cálculos hidráulicos para el sistema diseñado | 71 |
| | |
| Figura 1-1: Localización del área del de estudio | 6 |
| Figura 1-2: Vista en detalle de la ciudad de Cumaná (izquierda) y detalle de la cuenca vertiente de la laguna de Los Patos (derecha). | 7 |
| Figura 1-3: La Laguna de los Patos con la ciudad de Cumaná al fondo. | 8 |
| Figura 1-4: Playa de San Luis en Cumaná..... | 8 |
| Figura 1-5: Esquema general en planta del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales. | 9 |
| Figura 1-6: Esquema general de funcionamiento del sistema de tratamiento y <i>bypass</i> de la Laguna de Los Patos..... | 10 |
| Figura 3-1: Perfil longitudinal del emisario submarino. | 12 |
| Figura 3-2: Batimetría de la zona de estudio obtenida a partir de la batimetría costera aportada por el Servicio de Hidrografía y Navegación (SHN) de la Armada Bolivariana de Venezuela. | 13 |
| Figura 3-3: Evolución del nivel de marea astronómica en la zona de estudio. | 14 |
| Figura 3-4: Valores medios mensuales en la zona costera de la Laguna de Los Patos de salinidad (a) y temperatura (b) obtenidos de la base de datos WOA05. | 15 |
| Figura 3-5: Rosa de direcciones de viento promedio para la zona de estudio. Fuente: datos horarios del reanálisis CFSR (1979-2009). | 16 |
| Figura 3-6: Valores medios mensuales de temperatura del aire en el punto más cercano a la Laguna de Los Patos recogido en la base de datos COADS05. | 17 |
| Figura 3-7: Esquema general de la red de saneamiento del oeste de Cumaná. | 20 |
| Figura 3-8: Zonificación de usos. | 21 |
| Figura 4-1: Diagrama de flujo de diseño ambiental | 23 |

| | |
|--|----|
| Figura 4-2: Configuración del 3DLIF (Tian <i>et al.</i> , 2004). | 26 |
| Figura 4-3: Configuraciones del tramo difusor analizadas en medio no estratificado en el caso es estacionario (arriba) (tian et al, 2004) y con la existencia de corriente (abajo) (tian et al, 2004). | 27 |
| Figura 4-4: Diagrama de cálculo para estimar la dilución inicial mínima en un medio no estratificado. | 28 |
| Figura 4-5: Dilución en continuo durante el año 2001 del efluente del <i>bypass</i> EDAR Laguna de Los Patos vertido a través de emisario submarino. | 28 |
| Figura 4-6: Acople entre los resultados del modelo de dilución inicial y el modelo de dispersión. Vista de perfil. | 30 |
| Figura 4-7: Acople entre los resultados del modelo de dilución inicial y el modelo de dispersión. Vista en planta. | 30 |
| Figura 4-8: Ejemplo de malla σ . | 33 |
| Figura 4-9: Malla numérica utilizada en la simulación de la zona costera de la Playa de San Luis colindante con la Laguna de Los Patos. | 34 |
| Figura 4-10: Condiciones de contorno utilizadas en las simulaciones. | 35 |
| Figura 4-11: Ejemplo del campo de corrientes promediadas en profundidad en la zona de estudio en un instante del periodo de simulación con marea llanante. | 37 |
| Figura 4-12: Ejemplo del campo de corrientes promediadas en profundidad en la zona de estudio en un instante del periodo de simulación con marea vaciante. | 38 |
| Figura 4-13: Esquema de funcionamiento del modelo de contaminación bacteriológica. | 39 |
| Figura 4-14: Puntos de control seleccionados para el seguimiento de la evolución de la contaminación fecal. | 42 |
| Figura 4-15: Serie temporal de la concentración de Coliformes Totales (CT/100ml) máxima registrada en la playa de San Luis en cada instante del periodo de simulación. | 43 |
| Figura 4-16: Ejemplo de evolución de la concentración de Coliformes Fecales en la capa superficial en diferentes instantes del período de simulación. | 44 |
| Figura 5-1: Esquema metodológico de cálculo hidráulico. | 46 |
| Figura 5-2: Caudales (l/s) en los elevadores en los 2 escenarios. | 55 |
| Figura 5-3: Velocidades (m/s) en los elevadores en los 2 escenarios. | 56 |
| Figura 5-4: Caudales (l/s) de salida en las boquillas en los 2 escenarios. | 56 |
| Figura 5-5: Velocidades (m/s) de salida en las boquillas en los 2 escenarios. | 57 |
| Figura 5-6: Características de la bomba marca Flygt modelo 3356 NT. | 60 |
| Figura 5-7: Dimensiones recomendadas para un pozo de planta rectangular. | 62 |
| Figura 5-8: Sección de cámara de aspiración, estación de bombeo y cámara de carga. Niveles máximos y mínimos de funcionamiento. | 64 |
| Figura A-1: Esquema y localización de elementos. | 72 |
| Figura A-2: Perfil longitudinal del emisario terrestre | 73 |
| Figura A-3: Perfil longitudinal del emisario submarino | 73 |
| Figura A-4: Secciones tipo de los emisarios terrestre y submarino. | 75 |

1. INTRODUCCIÓN

Cumaná es una importante ciudad del oriente venezolano, en la entrada del golfo de Cariaco, junto a la desembocadura del río Manzanares, Figura 1-1 y Figura 1-2. Actualmente posee una población de 374.706 habitantes, que al sumarle los de las localidades aledañas de El Peñón, Cantarrana y El Tacal y otras poblaciones cercanas, forma una conurbación con un total de 680.918 habitantes que integran el Área metropolitana de Cumaná, distribuidos en 598 km² de superficie. Es la capital del Estado Sucre y centro de la región oriental.



FIGURA 1-1: LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DEL DE ESTUDIO

Adyacentes a la ciudad se encuentran las mayores playas del estado de Sucre - la playa de San Luis (Figura 1-3) de unos 4 kilómetros de longitud y a continuación de ésta, al sur, la playa del Chivo.

El Parque Litoral Laguna de Los Patos (Figura 1-4) al oeste de la ciudad de Cumaná, ocupa un área aproximada de 320 hectáreas de lagunas interconectadas con profundidades generalmente no mayores de 1 m y alberga una gran diversidad biológica que comprende 61 especies de 30 familias diferentes.

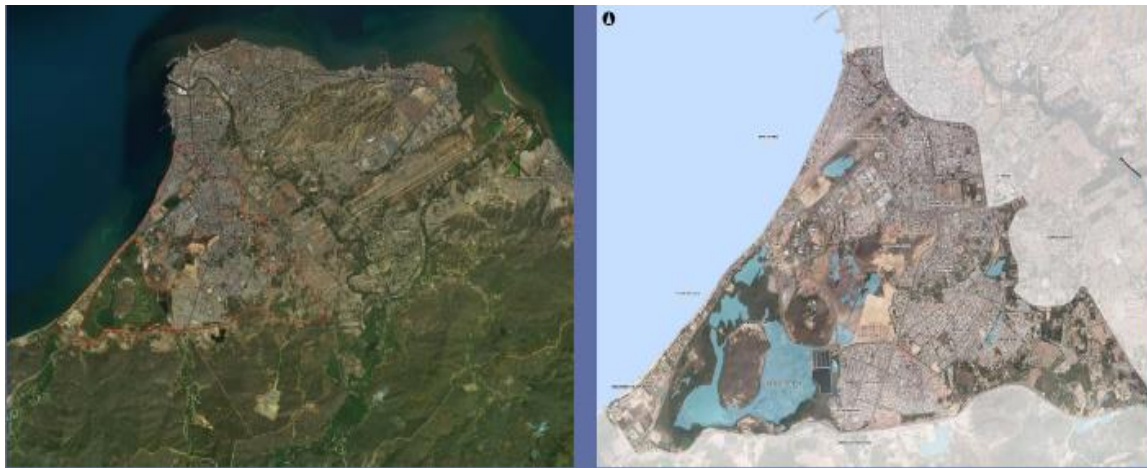


FIGURA 1-2: VISTA EN DETALLE DE LA CIUDAD DE CUMANÁ (IZQUIERDA) Y DETALLE DE LA CUENCA VERTIENTE DE LA LAGUNA DE LOS PATOS (DERECHA).

La expansión urbana poco planificada experimentada por la ciudad y otros factores han producido varios problemas, entre los cuales, pero no exclusivamente, están:

- Inundaciones urbanas.

- Carencia, en cantidad y calidad, de espacios públicos, áreas verdes y equipamientos en las zonas urbanas más densamente pobladas.

- Movilidad y accesibilidad urbana poco efectiva.

- Averías, mala gestión, obsolescencia y desgaste de la infraestructura.

- Canales de drenaje con capacidad hidráulica comprometida.

- Ecosistema lagunar costero alterado y contaminado.

En concreto uno de los problemas más graves a los que se enfrenta la Laguna de Los Patos es el vertido de aguas servidas desde la EDAR del mismo nombre, hoy inoperativa, y desde los canales de drenaje urbano que reciben los efluentes residuales de la población de Cumaná.

Por otro lado, el estado de deterioro de la red de colectores, que data de los años cincuenta del siglo pasado, y los elevados consumos de agua potable en la localidad, han dado lugar a que los caudales que llegan a dicha EDAR sean muy altos (superando una dotación de 800 l/hab./día). En tiempos de tormenta o en caso de avería, la capacidad de la EDAR queda ampliamente excedida.

Además de esto se añade el problema de la eutrofización de la laguna, producida por obras realizadas en los alrededores y, en especial, el propio vertido de aguas residuales sin en nivel de tratamiento adecuado y los vertidos de aguas de escorrentía urbana,

fuertemente contaminadas, en periodos de lluvia intensa o cuando falla el sistema de depuración (por averías o falta de suministro eléctrico, lo que es habitual dada la precaria economía de la zona y el país).



FIGURA 1-3: LA LAGUNA DE LOS PATOS CON LA CIUDAD DE CUMANÁ AL FONDO.

Para prevenir la comentada eutrofización de la laguna, es necesario mantener el vertido del efluente de la planta con una adecuada depuración, ya que la aportación natural de aguas limpias procedentes de la escorrentía de lluvia, que podría mitigar este proceso, resulta hoy en día insuficiente (en especial en la temporada seca).

Otro gran problema es el que se da en la zona costera. Como se ha mencionado, en Cumaná hay grandes playas, estas tienen extensas zonas de baño cuya calidad se ve amenazada por los mismos vertidos residuales que afectan a la laguna.



FIGURA 1-4: PLAYA DE SAN LUIS EN CUMANÁ

Ante esta situación, es imprescindible mejorar la calidad de las aguas que se vierten a la laguna, aumentando los niveles de depuración de la EDAR, y evacuar los excedentes en tiempo de lluvia o en condiciones de avería de la Planta.

Por los motivos expuestos, la rehabilitación del sistema de aguas de la ciudad consiste en varias medidas:

- 1) La ampliación de la EDAR con una laguna de aireación, una laguna de sedimentación y una zona de desbaste y desarenado.
- 2) La realización de un humedal artificial que contribuirá a la eliminación de contaminantes de las aguas residuales.
- 3) La realización de una actuación *bypass* para evacuar al mar el caudal excedente producido ya sea por problemas de funcionamiento de la propia EDAR o por causas extraordinarias, como inundaciones o averías en el sistema.

El esquema de este conjunto de actuaciones se recoge en Figura 1-5 y Figura 1-6.

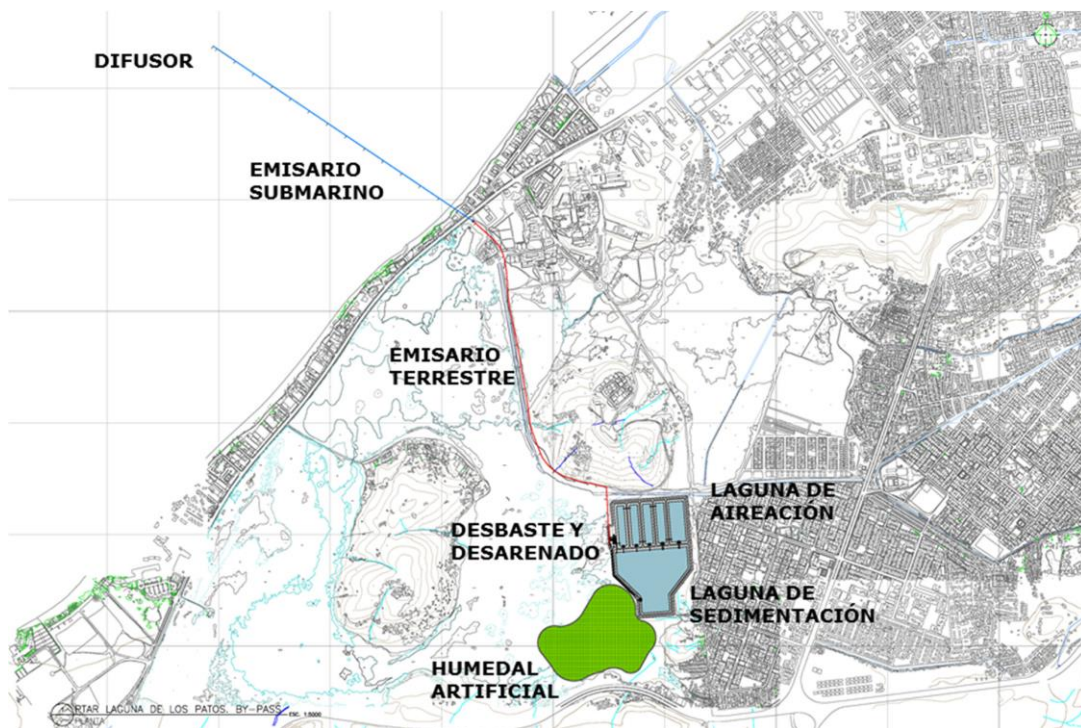


FIGURA 1-5: ESQUEMA GENERAL EN PLANTA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

DISEÑO DEL SISTEMA DE EVACUACIÓN DE AGUAS DEPURADAS DE LA E.D.A.R.
DE LA LAGUNA DE "LOS PATOS" EN CUMANÁ (VENEZUELA)

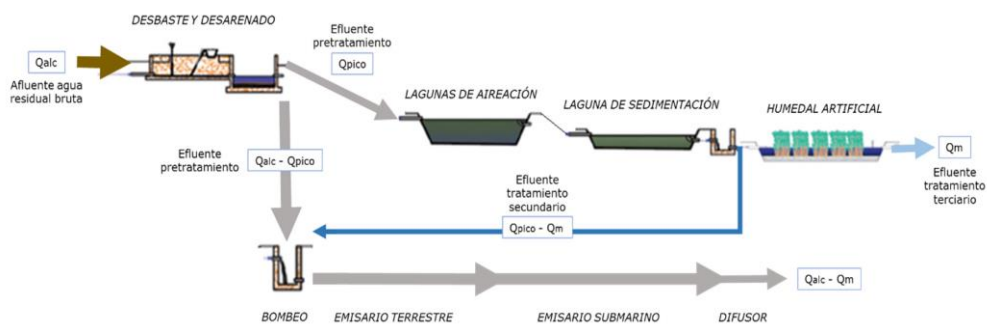


FIGURA 1-6: ESQUEMA GENERAL DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO Y *BYPASS* DE LA LAGUNA DE LOS PATOS.

2. OBJETIVOS

De las tres medidas expuestas que formaran parte del Sistema de Tratamiento de las aguas residuales, este trabajo se centra en el *bypass* de la EDAR

El *bypass* de la planta se ha planteado manteniendo un sistema similar al actual y añadiendo a este un emisario terrestre y un emisario submarino.

Objetivos del trabajo:

-Diseño ambiental del emisario submarino en el entorno marino, de tal forma que asegure la calidad de la zona de baño.

Consiste en combinar de forma iterativa los resultados obtenidos del estudio de **Campo cercano** (dilución inicial) y **Campo lejano** (advección, dispersión e inactivación de contaminantes) para conseguir una solución óptima para el emisario, más concretamente las características del tramo difusor – su longitud, profundidad de vertido, orientación, numero de tubos elevadores y la distancia entre ellos, diámetro de las boquillas y su número por tubo elevador.

-Diseño hidráulico de los emisarios terrestre y submarino para definir los diámetros de las tuberías, del difusor, de los topos elevadores y de las boquillas, asimismo los parámetros del bombeo necesario para evacuar los caudales excedentes.

Este sistema busca solventar 2 de los problemas expuestos con anterioridad.

1) Actuar como *bypass* de la EDAR en caso de emergencia, como averías e inundaciones, evitando de esta manera situaciones como la actual, en la cual la laguna está recibiendo vertidos residuales sin depurar.

2) Asegurar un alejamiento adecuado del vertido al mar, con el fin de asegurar que la contaminación bacteriológica no afecta a las zonas de baño de las playas de Cumaná.

3. DATOS DE PARTIDA

3.1. Topografía

Para la ubicación en planta y alzado del tramo terrestre del sistema de evacuación de la EDAR Laguna de Los Patos, se ha utilizado el modelo digital del terreno (MDT) generado por el proyecto ICES, actualizado con la nueva información topográfica y de batimetría de la laguna obtenida en los estudios preliminares. En la 3-1 se recoge, a modo de ejemplo, el perfil longitudinal del terreno entre la estación de bombeo de la EDAR y el borde litoral.

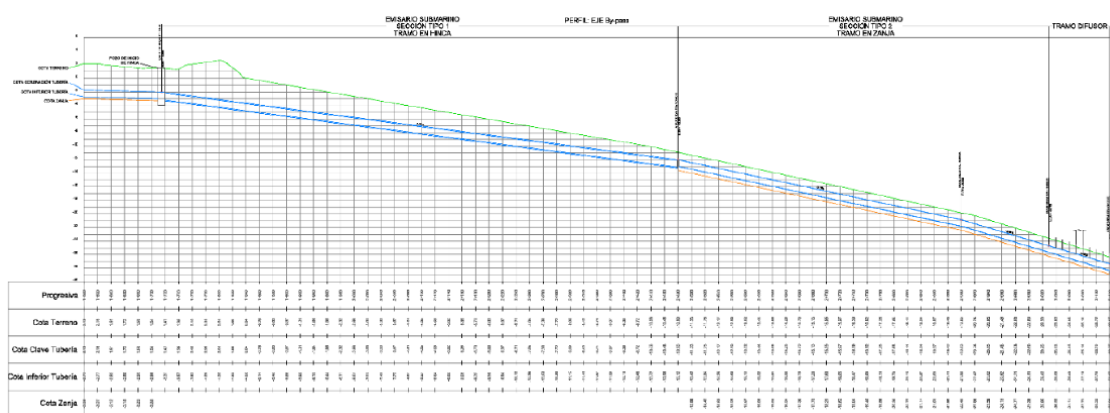


FIGURA 3-1: PERFIL LONGITUDINAL DEL EMISARIO SUBMARINO.

3.2. Batimetría

La información batimétrica del fondo marino es clave en cualquier estudio que analice tuberías con salida al mar. En este estudio la batimetría se ha obtenido a partir de la información aportada por el Servicio de Hidrografía y Navegación (SHN) de la Armada Bolivariana de Venezuela. En la Figura 3-2 se muestra la batimetría generada en la zona del emisario submarino.

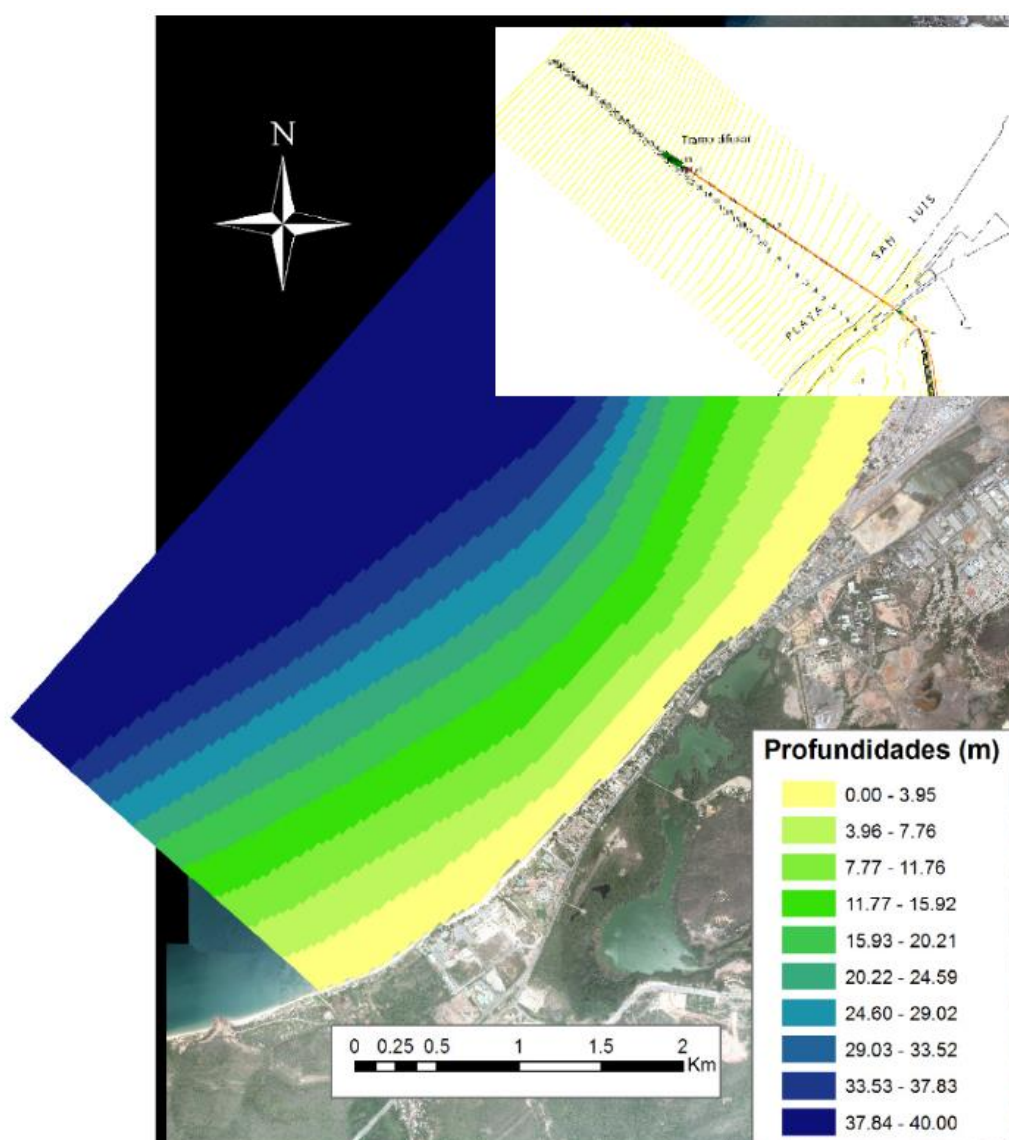


FIGURA 3-2: BATIMETRÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO OBTENIDA A PARTIR DE LA BATIMETRÍA COSTERA APORTADA POR EL SERVICIO DE HIDROGRAFÍA Y NAVEGACIÓN (SHN) DE LA ARMADA BOLIVARIANA DE VENEZUELA.

3.3. Nivel del Mar

Las condiciones de contorno de marea se han extraído de las componentes armónicas proporcionadas por la base de datos TPXO que caracteriza el nivel del mar en cualquier punto del planeta a partir de las observaciones del sensor TOPEX/Poseidon. Actualmente, el modelo TPXO, que es uno de los modelos globales de marea más precisos, proporciona cuatro componentes armónicas semidiurnas (M2, S2, N2, K2),

cuatro componentes diurnas (K1, O1, P1, Q1) y dos de largo periodo (Mf y Mm), en una malla con cobertura global de 1.440 x 721 puntos con 0,25° de resolución espacial.

En este trabajo se ha utilizado la base de datos más reciente: TPXO7.2. En la siguiente Figura 3-3 se muestra un ejemplo del nivel de marea astronómica obtenido con las componentes armónicas del punto TPXO más cercano a la zona de estudio. A efectos del diseño hidráulico, la cota de marea máxima considerada es +0,2 m respecto al nivel medio del mar (NMM).

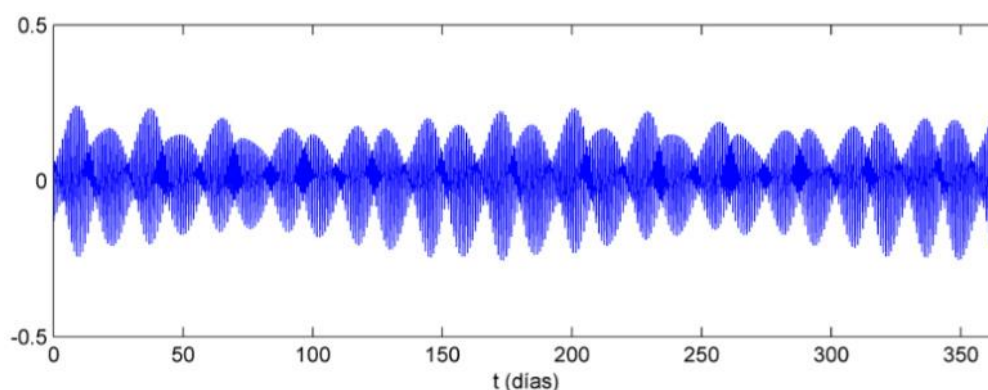


FIGURA 3-3: EVOLUCIÓN DEL NIVEL DE MAREA ASTRONÓMICA EN LA ZONA DE ESTUDIO.

3.4. Salinidad, Temperatura y Densidad del agua del Mar

La temperatura y salinidad de la zona costera se ha extraído de la base de datos “World Ocean Atlas 2005” (WOA05) (https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA05/pr_woa05.html). Esta base de datos recoge información de salinidad y temperatura con una resolución temporal mensual para toda la extensión oceánica con 1° de resolución espacial. En la Figura 3-4 se muestra, a modo de ejemplo, la temperatura y salinidad media mensuales en la zona de estudio

A partir de los datos de temperatura y salinidad de la zona costera de Cumaná obtenidos de la base de datos World Ocean Atlas 2005 (WOA05) se ha establecido una densidad del agua marina de 1.026 t/m³.

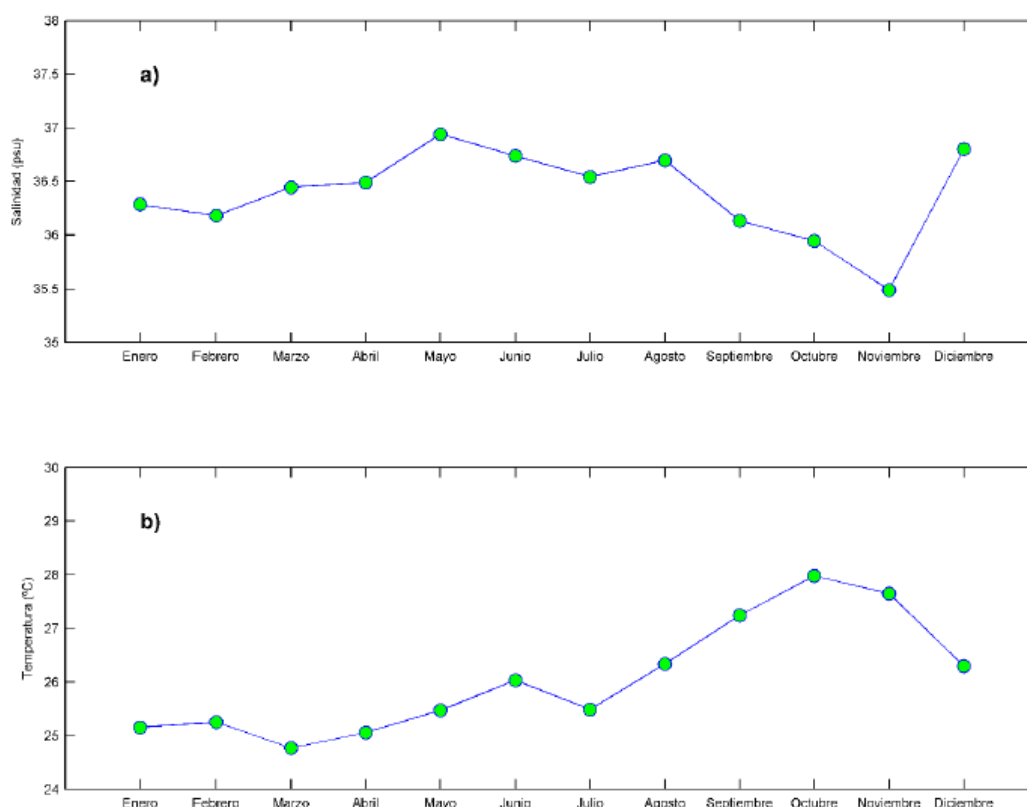


FIGURA 3-4: VALORES MEDIOS MENSUALES EN LA ZONA COSTERA DE LA LAGUNA DE LOS PATOS DE SALINIDAD (A) Y TEMPERATURA (B) OBTENIDOS DE LA BASE DE DATOS WOA05.

3.5. Viento y Temperatura del aire

La información de viento se ha obtenido del sistema de reanálisis CFSR (Climate Forecast System Reanalysis, The National Centers for Environmental Prediction NCEP), actualizados en enero del 2010, que contiene la información de un periodo de 31 años, desde 1979 a 2009. El sistema CFSR es un sistema global de alta resolución que acopla todos los procesos de la atmósfera, del océano, del hielo, y de la tierra, con el objetivo de proporcionar la mejor estimación de la situación de estos dominios durante el periodo de estudio. Los datos atmosféricos que proporciona este sistema tienen una resolución temporal horaria y una resolución espacial de $0,3125^\circ$ para los campos de vientos.

En la Figura 3-5 se muestra la rosa de direcciones de un año promedio de viento para los 31 años (1979-2009) que abarca el análisis, obtenido en el punto CFSR más próximo a la zona de estudio.

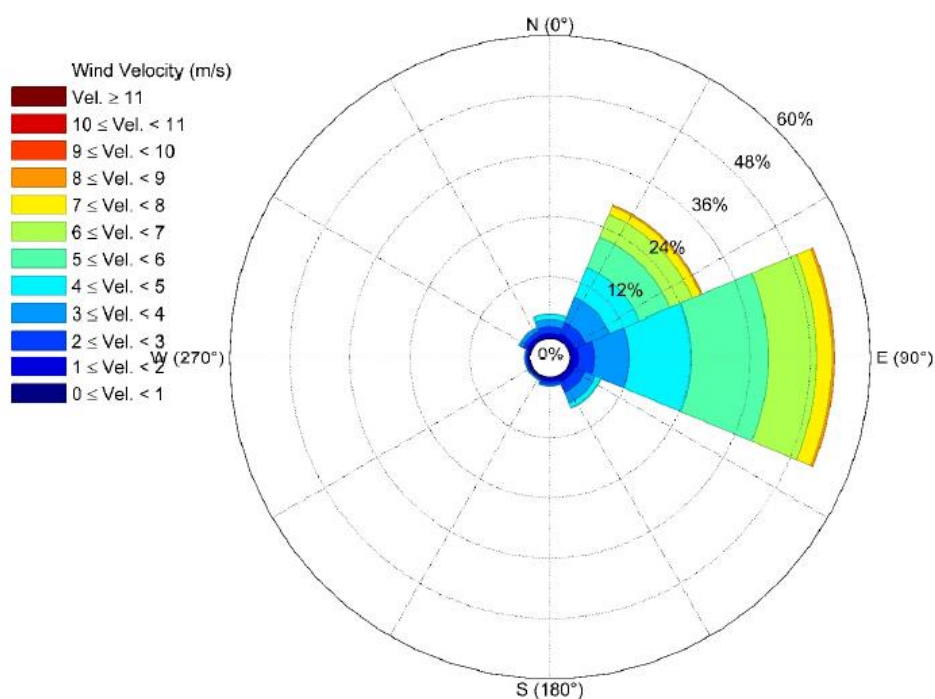


FIGURA 3-5: ROSA DE DIRECCIONES DE VIENTO PROMEDIO PARA LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: DATOS HORARIOS DEL REANÁLISIS CFSR (1979-2009).

La información de temperatura del aire se obtenido de la base de datos COADS05 (<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.COADS/>). Esta base de datos generada por Slutz *et al.* (1985) fue creada como un proyecto cooperativo para almacenar un registro histórico de datos global durante el periodo 1854-1979 por los centros de investigación National Climatic Data Center (NCDC), Environmental Research Laboratories, Institute for Research in Environmental Sciences y el National Center for Atmospheric Research. Dentro de esta base de datos se dispone de la temperatura media mensual del aire para el periodo registrado con una discretización espacial de 2°. En la Figura 3-6 se muestra la temperatura media mensual del aire obtenida del registro de la base de datos en el punto más cercano a la Laguna de Los Patos.

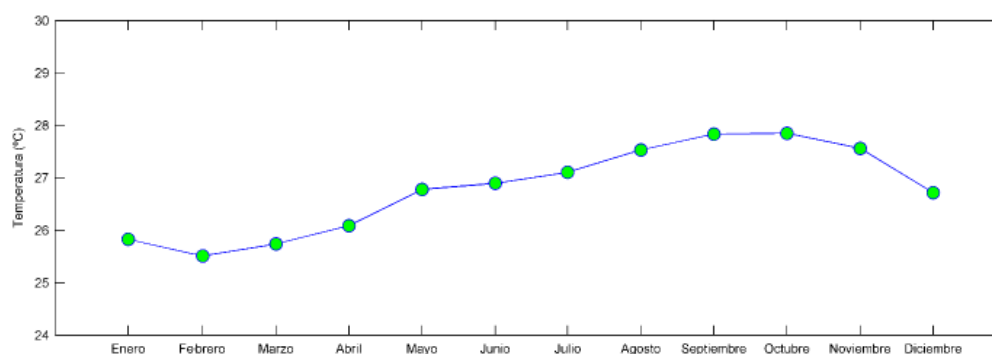


FIGURA 3-6: VALORES MEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURA DEL AIRE EN EL PUNTO MÁS CERCANO A LA LAGUNA DE LOS PATOS RECOGIDO EN LA BASE DE DATOS COADS05.

3.6. Vertido de la EDAR

Las cargas del vertido de la EDAR Laguna de Los Patos han sido proporcionadas por Hidrocaribe. En la Tabla 1 se recogen los valores medios que presenta el efluente de la planta para los siguientes parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

| Elemento | Concentración |
|---|------------------|
| Oxígeno Disuelto (g/m^3) | 7,6 |
| DBO_5 (gO_2/m^3) | 39,0 |
| Salinidad (psu) | 0,4 |
| Amonio (gN/m^3) | 10,0 |
| Nitrato (gN/m^3) | 6,77 |
| Fosfato (gP/m^3) | 2,5 |
| Coliformes Fecales (UFC/100ml) | $2,1 \cdot 10^9$ |
| Coliformes Totales (UFC/100ml) | $2,3 \cdot 10^9$ |

TABLA 1: CARGAS DEL EFLUENTE DE LA EDAR LAGUNA DE LOS PATOS.

3.7. Población actual y futura

Como año horizonte para el diseño de la EDAR, se ha establecido 2067, para una vida útil de la infraestructura de 50 años, tomando como inicio el año 2017. Como población estimada para el año horizonte, en la Tabla 2 se recoge la evolución de la población desde 2017 para las parroquias de Ayacucho y Altagracia (población servida por la Planta de Tratamiento Laguna de Los Patos).

| Parroquia | 2017 | 2020 | 2030 | 2050 | 2067 |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Altagracia | 170.168 | 177.651 | 197.946 | 226.591 | 248.735 |
| Ayacucho | 45.694 | 47.044 | 50.977 | 55.170 | 60.562 |
| Total | 215.862 | 224.695 | 248.923 | 281.761 | 309.297 |

TABLA 2: ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE POBLACIÓN SERVIDA POR EL SISTEMA DE SANEAMIENTO.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE LOS DATOS DEL INE DE 2014.

Se considera que la población reflejada en la Tabla 2 incluye la población flotante o de temporadas vacacionales.

3.8. Caudales de aguas residuales

La EDAR actualmente recibe un caudal de 1.400-1.700 l/s según los datos facilitados por Hidrocaribe (datos del 2016). El agua llega a la planta procedente de la red de saneamiento de la zona oeste de Cumaná.

El *bypass* de la planta debe de ser capaz de evacuar los caudales máximos que llegan a la EDAR tanto en situación actual como futura, por lo que el caudal máximo que manejará el sistema es el actual de 1.700 l/s, dado que toda actuación sobre la red de saneamiento conducirá a la reducción de este.

En condiciones de funcionamiento normal por el emisario se evacuarán los excedentes sobre el caudal pico del alcantarillado, que corresponden a los aportes por malos empotramientos del sistema, de $Q = 436$ l/s

Los caudales se recogen en la Tabla 3.

| Situación | l/s | m ³ /d | m ³ /h |
|------------------------------|-------|-------------------|-------------------|
| Emergencia | 1.700 | 146.880 | 6.120 |
| Funcionamiento normal | 436 | 37.670,4 | 1.569,6 |

TABLA 3: RESUMEN DE LOS CAUDALES DE DISEÑO.

3.9. Carga contaminante

En la Tabla 4 se presenta una propuesta de valores de cargas por habitante equivalente (h-e) y concentraciones de contaminantes en el agua residual bruta, utilizadas para el diseño de la planta de tratamiento.

| Contaminante | Dotación (g/h-e/d) | Concentración (mg/l) |
|---|--------------------|----------------------|
| Demanda bioquímica de oxígeno (DBOs) | 60 | 197,05 |
| Demanda química de oxígeno (DQO) | 140 | 459,79 |
| Sólidos en suspensión (SS) | 75 | 246,32 |
| Nitrógeno total (NTK) | 13 | 42,70 |
| Amonio (NH₄) | 8 | 26,27 |
| Fósforo (P) | 3 | 9,85 |

D: Dotación de carga contaminante por habitante equivalente.

P: Población equivalente en el año horizonte = 309.297 h-e.

Q: Caudal pico en el año horizonte = 1.090 l/s.

C: Concentración de contaminante = $[D \cdot P] / 86,4 \cdot Q$ mg/l.

Ejemplo para la concentración de DBO: $C = (60 \text{ g/h-e/d} \cdot 309.297 \text{ h-e}) / (86,4 \cdot 1.090 \text{ l/s}) = 197,05 \text{ mg/l}$.

TABLA 4: CONCENTRACIONES MEDIAS ESTIMADAS EN EL AGUA RESIDUAL BRUTA.

3.10. Red de saneamiento y EDAR

En el área de estudio de la Laguna de Los Patos y su área de influencia, las principales debilidades detectadas están producidas por el deterioro de la red de colectores, pozos de visita y estaciones de bombeo (Figura 3-7), y por la falta de operatividad de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (EDAR), debido al exceso de caudal de llegada a la misma y al mal estado de las instalaciones.

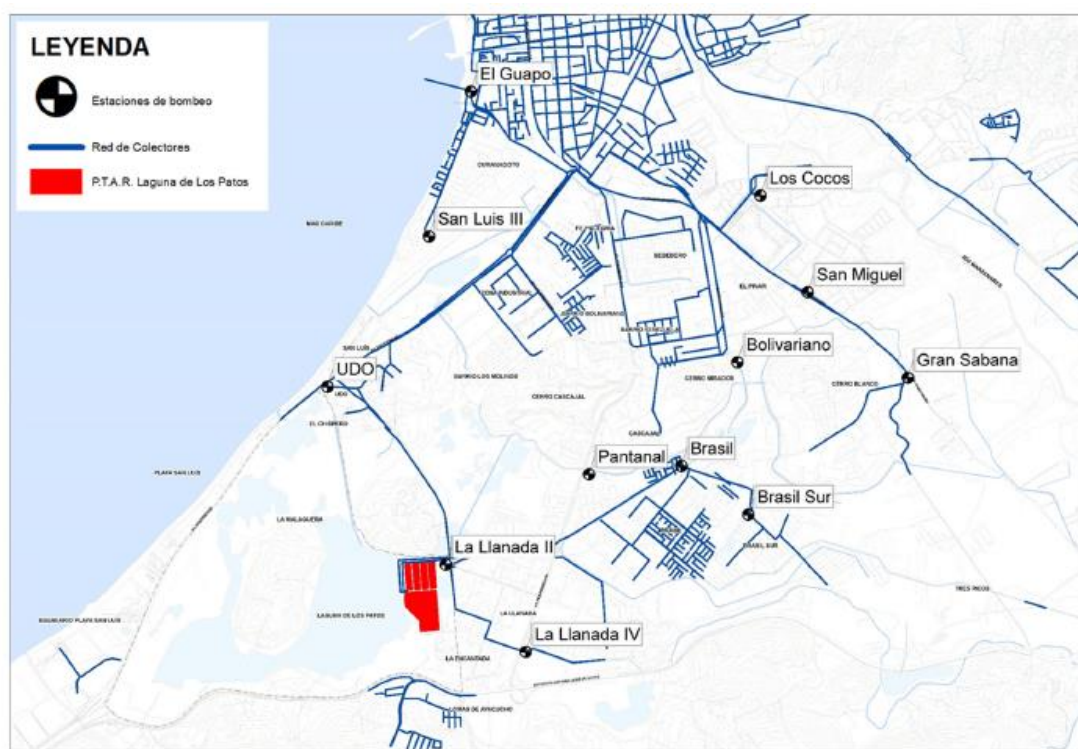


FIGURA 3-7: ESQUEMA GENERAL DE LA RED DE SANEAMIENTO DEL OESTE DE CUMANÁ.

La EDAR actualmente recibe un caudal de 1.400-1.700 l/s (Hidrocaribe, 2016). El agua llega a la planta procedente de la red de saneamiento de la zona oeste de Cumaná.

El esquema de procesos de tratamiento de agua residual es el siguiente:

- Pretratamiento: ▪ Desbaste. ▪ Desarenado.
- Tratamiento secundario: ▪ Lagunas de aireación.
- Tratamiento terciario: ▪ Laguna de maduración.

3.11. Normativa aplicable

En la zona de estudio existen dos normativas de necesario cumplimiento de acuerdo con la posible afectación generada por el vertido descargado a través de emisario submarino:

- Decreto 883 de 11 de octubre de 1995 de normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos en Venezuela.
- Gaceta 4.103. Normas sanitarias para el proyecto, construcción, ampliación reforma y mantenimiento de las instalaciones sanitarias para desarrollos urbanísticos.

El cálculo de la Dilución inicial se hace siguiendo los criterios recogidos en la Instrucción para el proyecto de conducciones de vertidos desde tierra al mar (MOPU, 1993) de la legislación española. Se ha utilizado esta referencia ya que no se conoce una normativa venezolana que determine la dilución inicial exigible. El valor de dilución igual a 100 es de obligado cumplimiento en España y comúnmente utilizado en el resto del mundo, ya que proviene de referencias internacionales.

Para la contaminación fecal se ha seguido el Decreto 883 de 11 de octubre de 1995 de normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos en Venezuela. De acuerdo con esta normativa, las aguas de la zona costera de la playa de San Luis se clasifican en aguas del Tipo 4 (aguas destinadas a balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia) y a su vez del subtipo 4^a (aguas para el contacto humano total).

3.12. Zona de Estudio

En la zona de estudio se han establecido dos usos de las aguas marinas – Tipo 4A y Tipo 6, que se especifican en la Figura 3-8

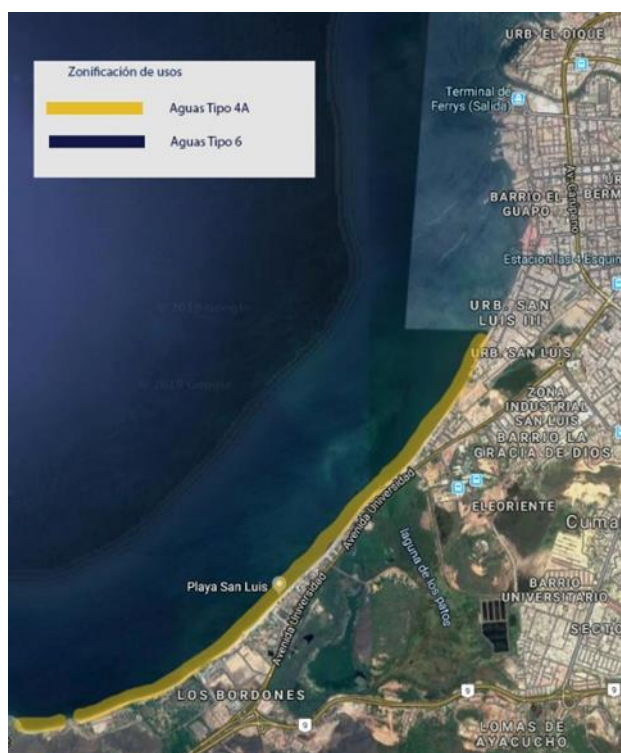


FIGURA 3-8: ZONIFICACIÓN DE USOS.

4. DISEÑO AMBIENTAL

4.1. Metodología

La dilución del contaminante que se produce después de ser vertido en el medio marino a través de un emisario submarino es resultado de la mezcla entre el efluente vertido con el medio acuático que lo envuelve. Se distinguen dos tipos de diluciones – dilución inicial o **campo cercano** y dilución secundaria o **campo lejano**.

La dilución inicial principalmente depende de la: diferencia de densidad entre ambos fluidos, la cantidad de movimiento del efluente en su salida a través de los difusores.

La dilución secundaria esencialmente depende de la advección, dispersión e inactivación bacteriana originados por las corrientes marinas, la luz solar, la temperatura y la salinidad del agua marina.

Realmente se trata de un proceso único que ha sido separado artificialmente por razones de oportunidad operativa de cálculo dada la complejidad matemática y computacional en caso de tratar todos los procesos mencionados con un solo modelo riguroso. Los modelos de campo cercano tienen una escala temporal de segundos o minutos y son básicamente empíricos, mientras que los modelos de campo lejano tienen una escala temporal de horas o días y tienen una sólida base teórica.

La mecánica operativa consiste en combinar de forma iterativa los resultados obtenidos del estudio de **Campo cercano** (dilución inicial) y del estudio de **Campo lejano** (advección, dispersión e inactivación de contaminantes) para conseguir una solución óptima para el emisario, más concretamente las características del tramo difusor – su longitud, profundidad de vertido, orientación, número de tubos elevadores y la distancia entre ellos, diámetro de las boquillas y su número por tubo elevador. En la Figura 4-1 se representa el diagrama de flujo de este proceso iterativo.

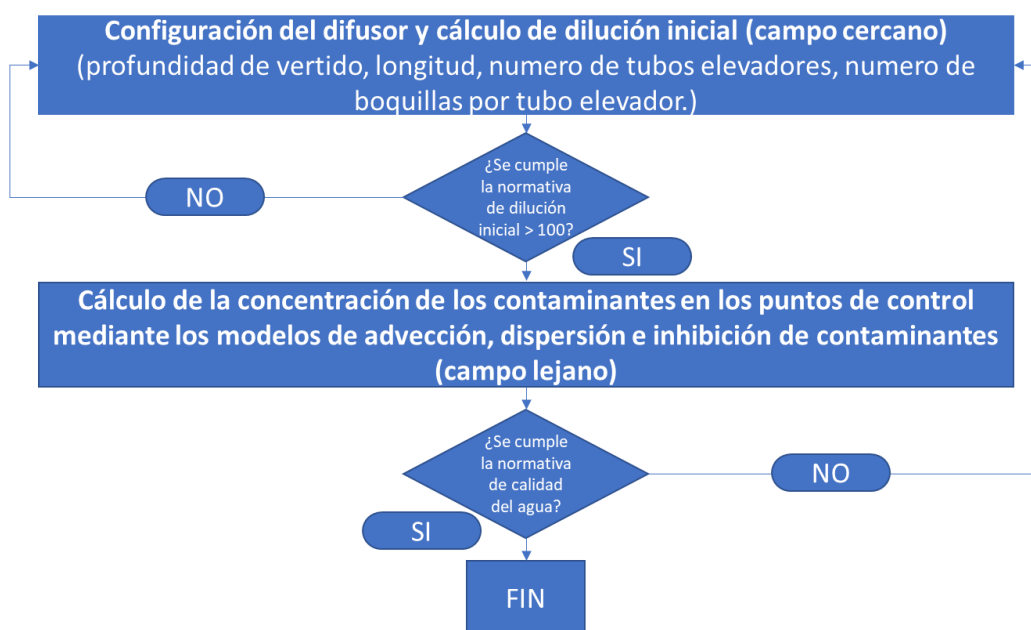


FIGURA 4-1: DIAGRAMA DE FLUJO DE DISEÑO AMBIENTAL

Más adelante se presentan los resultados finales después de aplicar la mecánica iterativa señalada en el diagrama de flujo. Se ha tenido en cuenta que la práctica indica que la concentración final en los puntos de control poco depende de dilución inicial y en realidad el difusor se diseña con la exigencia de conseguir dilución mínima mayor de 100, por esta misma razón la dilución secundaria en los puntos de control puede ser aumentada solo alejando el punto de vertido lo que en muchas ocasiones supone un aumento de la profundidad de vertido.

4.2. Dilución inicial

4.2.1. Introducción

Desde el punto de vista de las fuerzas impulsoras del movimiento, el efluente vertido en el medio receptor puede presentar forma de "chorro" o "pluma".

En el primero de los casos, las fuerzas dominantes en el proceso de dilución inicial son debidas a la propia cantidad de movimiento del fluido; en el segundo el transporte se origina, principalmente, por la diferencia de densidad entre el efluente y el agua circundante.

Mientras que la dilución inicial en chorros depende principalmente de la cantidad de movimiento del efluente, la dilución inicial en plumas está altamente influenciada por las características ambientales del medio acuático.

Existen diferentes soluciones numéricas a partir de técnicas analíticas y han sido desarrollados modelos complejos para una predicción más exacta de los comportamientos de chorros y plumas.

En este caso, para poder determinar la dilución inicial formada por el vertido del emisario que va a ser utilizado como *bypass* de la EDAR Laguna de Los Patos se aplicarán las formulaciones de Roberts 2004-2006. Estas formulaciones han sido extensamente contrastadas mediante datos de laboratorio.

Los resultados del modelo de dilución inicial serán acoplados al modelo de calidad del agua D-Water Quality para analizar el transporte y mezcla de las sustancias vertidas.

4.2.2. Metodología

El estudio de dilución inicial del efluente del emisario submarino se han utilizado los siguientes datos y se han obtenido los siguientes resultados:

- Caudal máximo del emisario - 1700 l/s (para los cálculos de las características del difusor).
- El caudal medio de diseño constante - 930 l/s
- El período de simulación es el año 2001, elegido en el capítulo 4.3 de este informe.
- Las características obtenidas del tramo difusor se recogen en la Tabla 5:

| Características del tramo difusor | |
|---|-----|
| Número de elevadores | 10 |
| Separación entre los elevadores (m) | 10 |
| Longitud elevadores (m) | 1,5 |
| Diámetro interior elevadores (mm) | 300 |
| Número de boquillas por elevador | 2 |
| Diámetro interior de las boquillas (mm) | 200 |

TABLA 5: RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL TRAMO DIFUSOR.

La metodología consiste en primer lugar a configurar, con el caudal de diseño, un difusor que proporciona una dilución inicial igual a 100, haciendo uso de las formulaciones de Roberts del año 2004-2006.

A continuación, para el periodo temporal del estudio seleccionado, se genera una serie temporal de diluciones, a partir de los caudales por el emisario en cada momento y mediante las mismas formulaciones citadas anteriormente.

La serie temporal así generada conforma los datos de entrada, después de la oportuna conversión de las diluciones en cargas contaminantes, para el modelo de advección y dispersión **D-Water Quality**.

4.2.3 Formulaciones de Roberts año 2004-2006

El vertido de un efluente residual en el mar con una densidad menor a la del medio receptor se comporta como un chorro con flotabilidad positiva y Roberts y sus colaboradores, en sus estudios, han elaborado un compendio de ecuaciones semiempíricas orientadas al análisis de la dilución alcanzada en vertidos de efluentes con flotabilidad positiva a través de emisarios submarinos.

Dentro de este tipo de estudios se puede diferenciar varios tipos de vertidos: vertido en un medio no estratificado estacionario, vertido en un medio no estratificado con interacción con corrientes, vertido en un medio estratificado estacionario y vertido en un medio estratificado con interacción con corrientes.

En este caso nos centraremos solo en un medio no estratificado, es decir, el medio receptor será considerado como un solo estrato.

En el estudio de la dilución de vertidos de efluentes con flotabilidad positiva, se han utilizado una serie de variables para poder definir los parámetros de los que depende la dilución en cada uno de los casos analizados. Los valores utilizados son los siguientes:

- $Q_j = Q_T/n$: Caudal por boquilla, siendo Q_T el caudal total y n el número de bocas. También se lo denomina flujo de volumen para una fuente puntual y puede calcularse como $Q_j = (\pi/4) \cdot d^2 \cdot u_j$.

-L: Longitud del tramo difusor.

-s: Separación entre elevadores.

-H: Profundidad de vertido.

- u_j : Velocidad en las bocas.

- g_0' : Gravedad modificada

- $q=Q_T/L$: Flujo de volumen para una fuente lineal.

- $M=u_j \cdot Q_j$: Flujo de momentum para una fuente puntual.
- $m=u_j \cdot q$: Flujo de momentum para una fuente lineal.
- $B=g_o' \cdot Q_j$: Flujo de flotabilidad para una fuente puntual.
- $b=g_o' \cdot q$: Flujo flotabilidad para una fuente lineal.
- $F=u_a^3/b$: Número de Froude de la corriente, donde u_a es la velocidad de ésta.
- N : Frecuencia de flotabilidad. Permite caracterizar las condiciones de estratificación del medio receptor.
- I_M : Longitud de escala de momentum para fuentes puntuales.
- I_m : Longitud de escala de momentum para fuentes lineales.
- I_B : Longitud de escala de flotabilidad para fuentes puntuales.
- I_b : Longitud de escala de flotabilidad para fuentes lineales.
- S_n : Dilución alcanzada en el campo cercano
- x_n : Longitud final del campo cercano.
- h_n : Espesor de la pluma al final del campo cercano.
- z_n : Altura donde se obtiene la dilución al final del campo cercano.
- z_{max} : Máxima altura alcanzada por la pluma en el campo cercano.

- *Vertido por emisario en medio receptor no estratificado*

Estas formulaciones se obtuvieron con base en los resultados de la dilución medida en laboratorio con 3DLIF (Fluorescencia tridimensional inducida por láser), con la configuración mostrada en la Figura 4-2, y con la realización de una prueba de microconductividad.

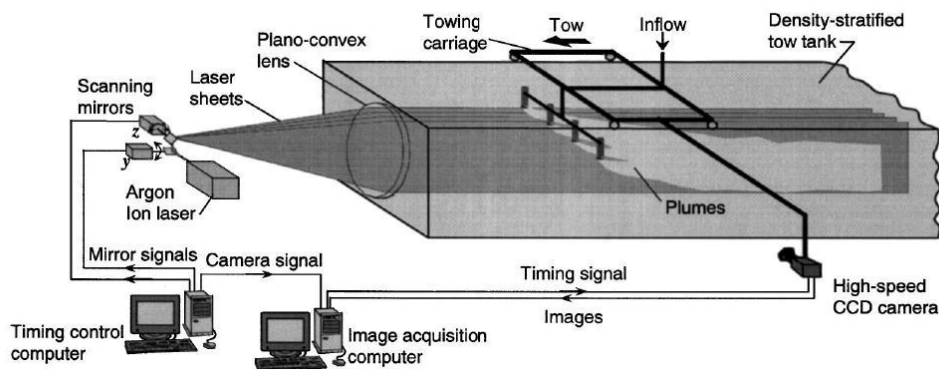


FIGURA 4-2: CONFIGURACIÓN DEL 3DLIF (TIAN ET AL., 2004).

Los ensayos realizados para calibrar las formulaciones de los casos estacionario y no estacionario han sido realizados para configuraciones tipo del tramo difusor como las mostradas en la Figura 4-3.

Como en este caso hay una existencia de corriente en el medio receptor se adopta una orientación perpendicular de las emisiones del vertido con respecto al eje del tramo difusor. Esta disposición de los emisarios submarinos es habitual, ya que se colocan de forma perpendicular a las curvas batimétricas, puesto que así aumenta la dilución.

En la Figura 4-4, de manera gráfica, se puede observar el diagrama de flujo que permite obtener la dilución inicial mínima para un tramo difusor con vertido en medio no estratificado.

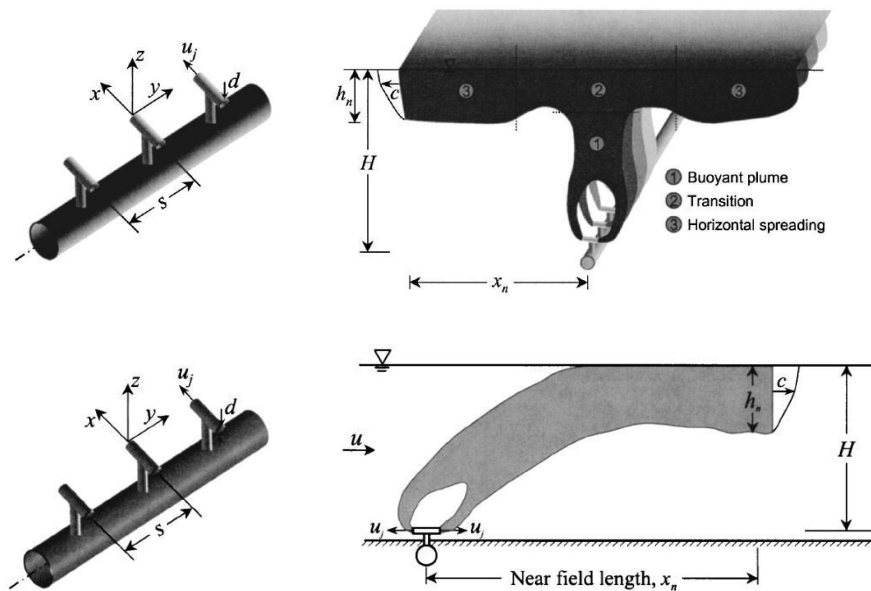


FIGURA 4-3: CONFIGURACIONES DEL TRAMO DIFUSOR ANALIZADAS EN MEDIO NO ESTRATIFICADO EN EL CASO ES ESTACIONARIO (ARRIBA) (TIAN ET AL, 2004) Y CON LA EXISTENCIA DE CORRIENTE (ABAJO) (TIAN ET AL, 2004).

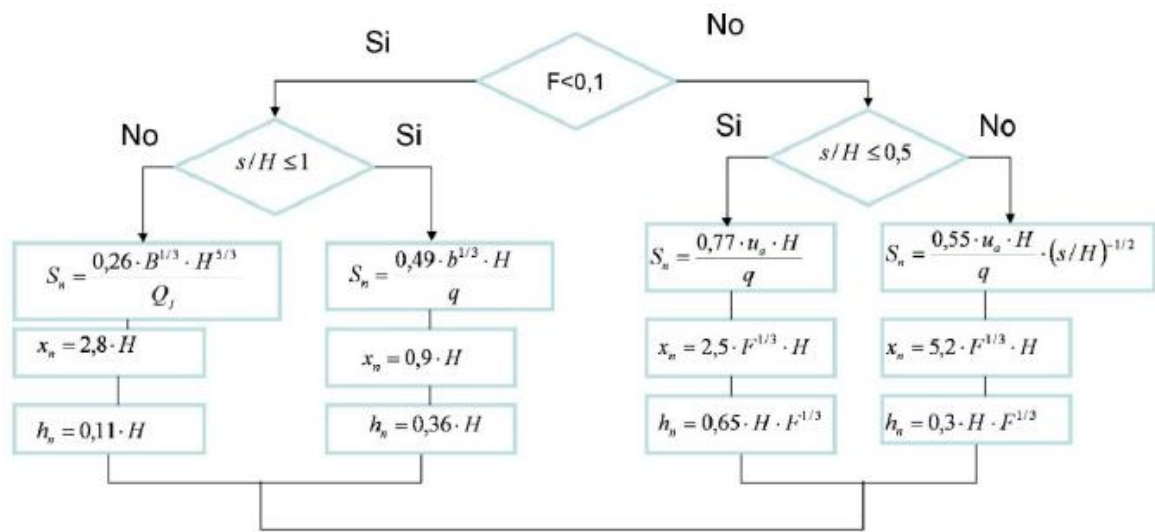


FIGURA 4-4: DIAGRAMA DE CÁLCULO PARA ESTIMAR LA DILUCIÓN INICIAL MÍNIMA EN UN MEDIO NO ESTRATIFICADO.

4.2.4 Cálculo de la dilución en continuo

Una vez comprobada la dilución proporcionada por el tramo difusor para el caudal de diseño (1700 l/s), donde se buscaba un valor de la dilución de 100 y donde se ha obtenido un valor de dilución superior a 100, siendo este un resultado positivo, se ha analizado la dilución en continuo del efluente para el caudal de funcionamiento futuro durante el año 2001.

En la Figura 4-5 se muestran los resultados de dilución inicial en continuo durante el periodo seleccionado.

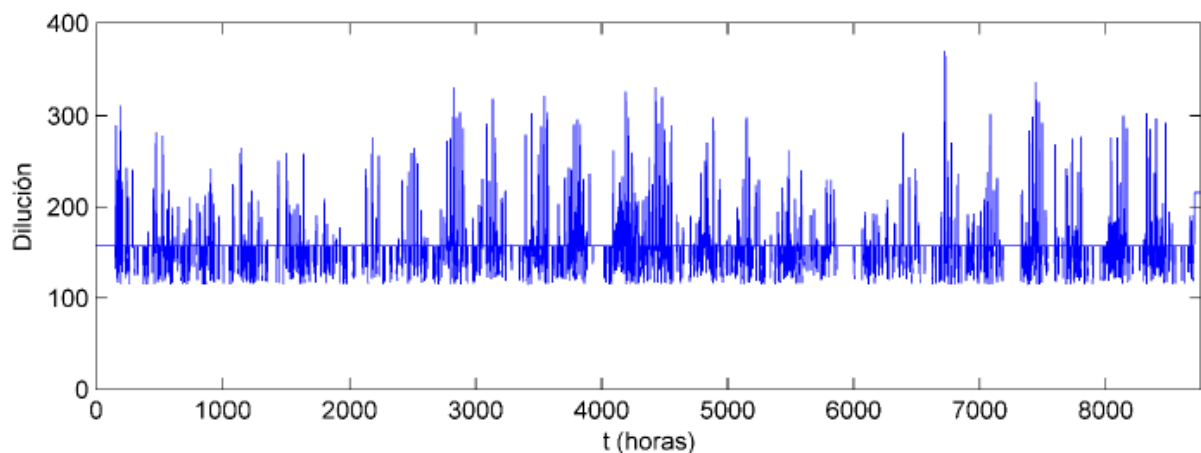


FIGURA 4-5: DILUCIÓN EN CONTINUO DURANTE EL AÑO 2001 DEL EFLUENTE DEL BYPASS EDAR LAGUNA DE LOS PATOS VERTIDO A TRAVÉS DE EMISARIO SUBMARINO.

La dilución inicial del vertido en continuo durante el período de estudio presenta valores mínimos de 115, máximo de 371 y medio de 160. De acuerdo con los valores de dilución inicial obtenidos, se alcanza un cumplimiento total de los requisitos de la Gaceta 4.103 en la localización de la descarga, incluso con los criterios más desfavorables.

4.2.5 Metodología para el acople del modelo dilución inicial con el análisis de la evolución del vertido

Como punto de partida se utilizarán los resultados de las formulaciones de la dilución inicial mínima, espesor, anchura, dirección y altura del centro de la pluma, y longitud de la zona de mezcla inicial del vertido (campo cercano).

Para el estudio de la dispersión del efluente (campo lejano), es necesario conocer las concentraciones de la pluma del vertido en el momento en el que sus velocidades son prácticamente horizontales y su movimiento se encuentra condicionado por las dinámicas de advección-dispersión.

Estos datos, obtenidos del estudio de la dilución inicial, se utilizan para la definición de la carga de contaminante en el modelo D-Water Quality, que se describe más adelante.

Para la realización del acople entre ambos modelos se tendrá en cuenta lo siguiente:

- Los resultados de dilución del vertido se transformarán en concentración en cada una de las celdas que se vean afectadas por el mismo en cada paso de tiempo, que tendrá una frecuencia horaria.

- Con base en el espesor de la pluma y altura del centro de esta se establecerán las capas verticales del modelo de dispersión en las que será introducido el vertido.

- Con la longitud del campo cercano, anchura de la pluma y dirección de esta se determinarán las celdas horizontales que marcan el final del campo cercano y, con ello, el inicio del campo lejano, en las que será introducida la concentración de contaminantes obtenida tras la dilución inicial para el modelo de advección y dispersión del vertido.

Esta metodología puede observarse de forma gráfica en la Figura 4-6 y en la Figura 4-7, en las que se muestra la transferencia de los resultados del modelo de dilución inicial al de advección y dispersión, en una vista de perfil y en planta, respectivamente.

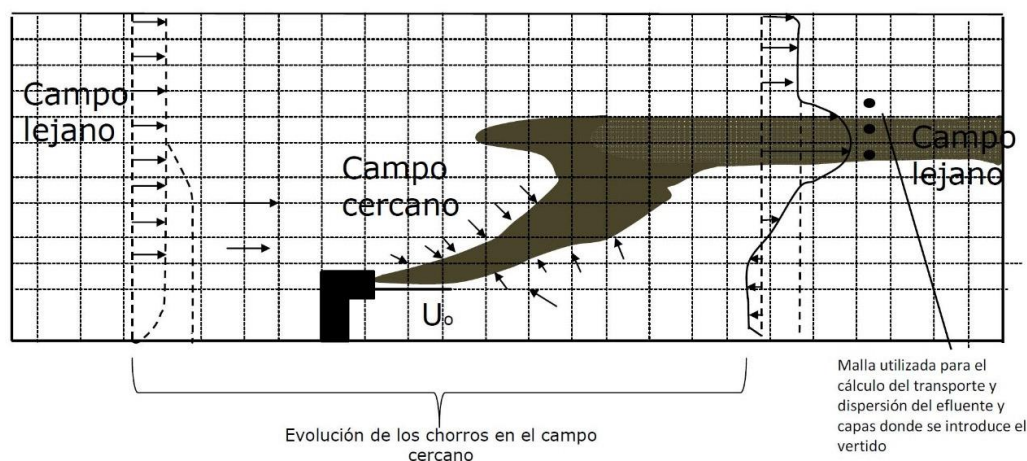


FIGURA 4-6: ACOPLE ENTRE LOS RESULTADOS DEL MODELO DE DILUCIÓN INICIAL Y EL MODELO DE DISPERSIÓN. VISTA DE PERFIL.

Velocidad ambiente

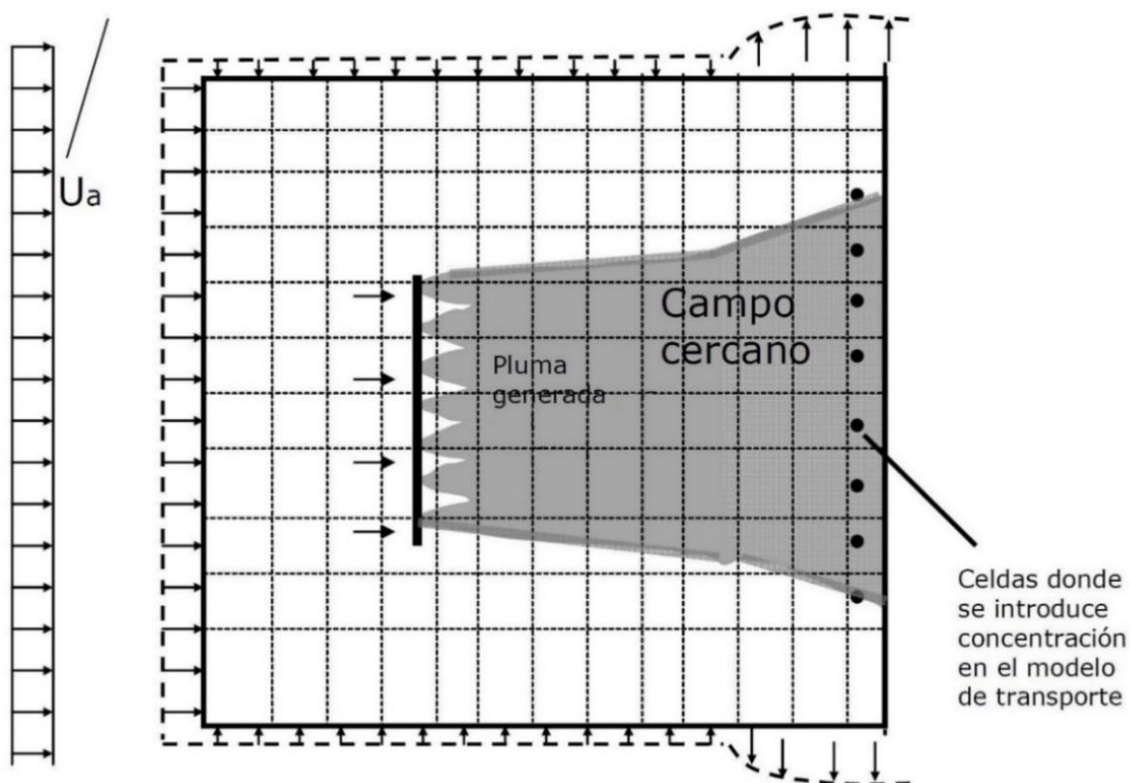


FIGURA 4-7: ACOPLE ENTRE LOS RESULTADOS DEL MODELO DE DILUCIÓN INICIAL Y EL MODELO DE DISPERSIÓN. VISTA EN PLANTA.

4.3. Hidrodinámica Marina

4.3.1. Introducción

Para el análisis adecuado de las sustancias u organismos que estarán presentes en el medio acuático será necesario realizar un estudio para conocer el campo de velocidades en cada punto de la zona interés.

En este caso, las corrientes que predominan son causadas debido a la acción de la marea astronómica y meteorológica (efecto del viento) en la zona costera.

El objetivo será realizar un modelado matemático de las corrientes, por lo cual se tendrá que realizar la integración de las ecuaciones de cantidad de movimiento, de transporte de salinidad y temperatura y de continuidad. Mediante la utilización de métodos numéricos se generará una malla que abarcará la zona de interés y cada punto contendrá la profundidad que se corresponda.

Para este proceso se usará la aplicación del modelo hidrodinámico **Delft3D**, con el cual se generarán las corrientes.

4.3.2. Metodología

Será necesario proporcionar al modelo Delft3D unas bases de datos lo más completas posibles, tanto instrumentales como numéricas y unos modelos numéricos que puedan reproducir las corrientes generadas por las dinámicas relevantes: las acciones causadas por la marea astronómica y la marea meteorológica (efecto del viento) en la zona costera.

Por ello, al modelo **Delft3D** se introducirán los datos recogidos en el capítulo 3 “datos de partida”. Así se podrá analizar hidrodinámicamente la zona costera de la Playa de San Luis en un año pluviométrico medio, eligiendo en este caso el año 2001.

La información hidrodinámica obtenida de la simulación de este escenario será utilizada para el posterior análisis de la contaminación bacteriológica.

4.3.3 Descripción del modelo hidrodinámico Delft3D

Delft3D es un sistema de modelado para investigar la hidrodinámica, el transporte de sedimentos y la morfología y la calidad del agua para entornos fluviales, estuarios y

costeros. Es capaz de resolver ecuaciones no lineales 2D (promediado en profundidad) y 3D para aguas someras.

Las formulaciones matemáticas incluidas en el modelo permiten tener en cuenta los siguientes fenómenos físicos:

- Efectos de la rotación de la Tierra (fuerza de Coriolis).
- Efectos baroclínicos.
- Masas de turbulencia inducida y flujos de momentos (modelos de cierre turbulento).
- Transporte de salinidad, temperatura y otras sustancias conservativas.
- Forzamientos de marea en contornos abiertos.
- Variaciones espacial y temporal de la tensión tangencial del viento en la superficie de la masa de agua.
- Variaciones espaciales de la tensión tangencial en el fondo.
- Variaciones espacial y temporal de la presión atmosférica en la superficie.
- Variación temporal de fuentes y sumideros (i.e. descargas en ríos).
- Inundación y secado de llanuras mareales.
- Flujos de calor.
- Efecto del oleaje.
- Flujo sobre estructuras hidráulicas

En cuanto a la discretización del dominio, en la dirección horizontal el modelo hace uso de coordenadas ortogonales curvilíneas siendo válidos los sistemas de coordenadas:

- Coordenadas cartesianas (ξ, η)
- Coordenadas esféricas (λ, φ)

En la dirección vertical se usa el sistema de coordenadas σ (σ -model). La malla σ , introducida por Phillips (1957) para modelos atmosféricos, consiste en capas contenidas por dos planos σ , no estrictamente horizontales pero que siguen la topografía del fondo y la superficie libre. Al ser la malla σ un contorno a medida entre el fondo y la superficie libre en movimiento se puede obtener una representación suave de la topografía.

El número de capas en el área computacional total será constante, independientemente de la profundidad local del agua. La distribución del espesor relativo de cada capa no es uniforme por lo que se podrá disponer de una mayor resolución en zonas de interés como cerca de la superficie, donde existe una gran importancia en flujos generados por viento y en intercambio de calor con la atmósfera, y cerca del fondo para el transporte de sedimentos

El sistema de coordenadas σ se define $\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H}$ como:
donde:

- z coordenada vertical en el espacio físico
- ζ elevación de la superficie libre sobre el plano de referencia (en $z=0$)
- d profundidad bajo el plano de referencia
- H profundidad total, dada por: $H = d + \zeta$

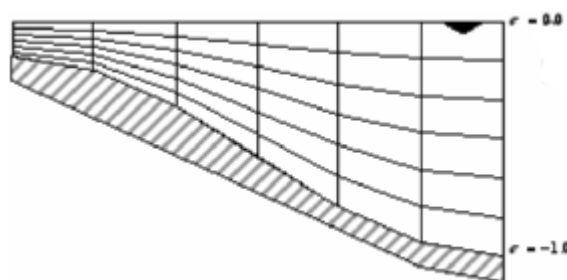


FIGURA 4-8: EJEMPLO DE MALLA Σ

4.3.4. Configuración del modelo Delft3D en la zona de estudio

-Discretización del dominio

La malla de cálculo, véase la Figura 4-9, recoge la zona costera de la Playa de San Luis enmarcada entre la zona denominada Los Bordones y la Urb. Cumanagoto I. Sobre esta malla se aplicará la información recogida en el capítulo 3, “datos de partida” para obtener las condiciones de contorno de la simulación.

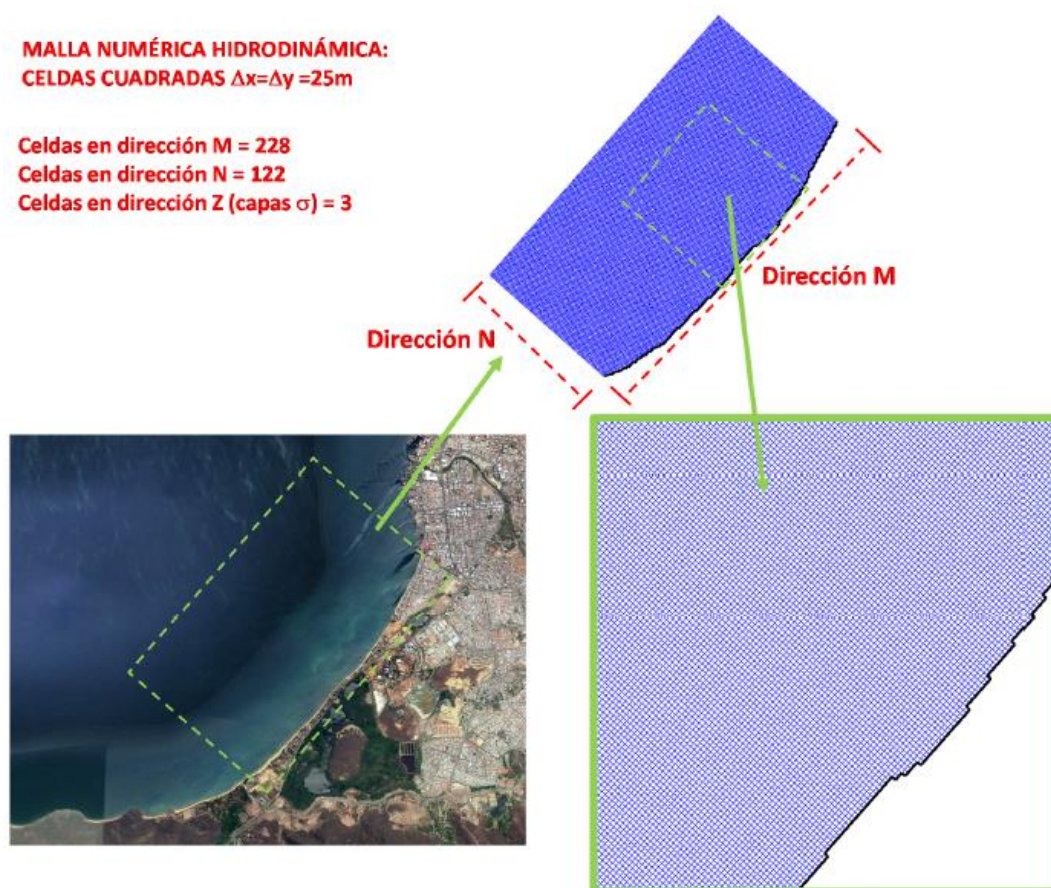


FIGURA 4-9: MALLA NUMÉRICA UTILIZADA EN LA SIMULACIÓN DE LA ZONA COSTERA DE LA PLAYA DE SAN LUIS COLINDANTE CON LA LAGUNA DE LOS PATOS.

Como malla de cálculo se emplea una malla de celdas cuadradas constituida por 228x122 celdas, en la dirección M y N, respectivamente. La resolución espacial es de 25 m.

Para la distribución vertical, se han definido 3 capas verticales equiespaciadas en coordenada σ a lo largo de la columna de agua. La representación en coordenada σ dispone el mismo número de capas en aguas profundas que en aguas someras y permite una buena adaptación a la superficie libre y a la batimetría.

-Condiciones iniciales y de contorno

Las condiciones de contorno utilizadas se muestran en la Figura 4-10.

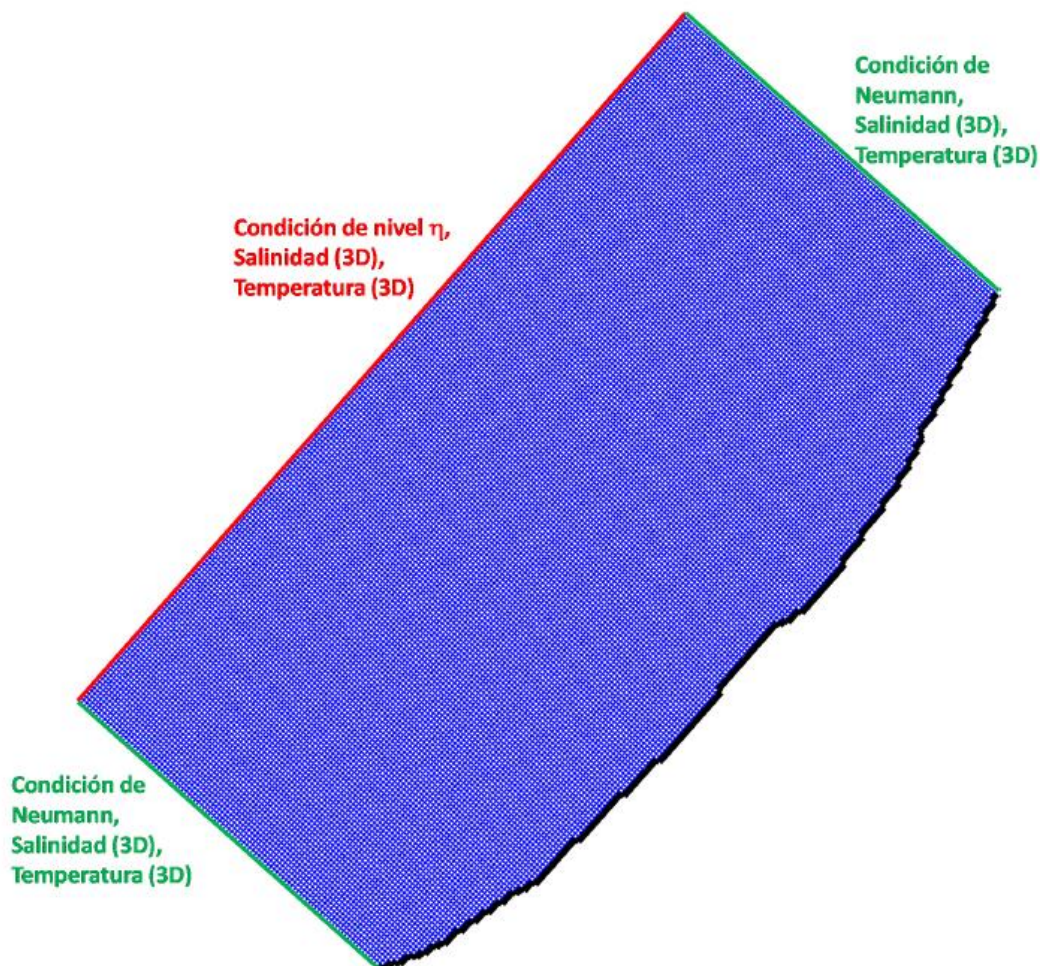


FIGURA 4-10: CONDICIONES DE CONTORNO UTILIZADAS EN LAS SIMULACIONES.

Como se aprecia en la Figura 4-10, los contornos exteriores izquierdo y derecho se han modelado mediante la imposición de una condición de contorno de Neumann (contorno abierto) y un perfil de salinidad y temperatura tridimensional variables a lo largo del tiempo, mientras que el contorno costa afuera se ha modelado mediante la aplicación de una condición de nivel del mar y un perfil de salinidad y temperatura tridimensional variables a lo largo del tiempo.

Las condiciones iniciales y de contorno de salinidad y temperatura del agua se han obtenido de la base de datos WOA05 (World Ocean Atlas 2005).

-Forzamientos atmosféricos

Los forzamientos atmosféricos, o campos de viento, se han obtenido de la base de datos CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) recogidos en el capítulo 4 “datos de partida”. Para la realización de las simulaciones se ha utilizado un régimen anual promedio de vientos.

-Parámetros físicos

Los parámetros físicos que se han utilizado para definir las simulaciones son los siguientes:

- Coeficiente de viscosidad turbulenta horizontal (μH) y coeficiente de difusividad turbulenta horizontal (DH): $0,25 \text{ m}^2/\text{s}$.
- Coeficiente de rozamiento por fondo (Manning n): $0,02$.

-Parámetros del modelo

En la realización de las diferentes ejecuciones se han tenido en cuenta los siguientes parámetros para el correcto funcionamiento del modelo:

- Para cumplir las condiciones de estabilidad en el cálculo con el modelo, ha sido utilizado un paso de tiempo de $0,2$ minutos.
- La resolución numérica de las ecuaciones ha sido llevada a cabo mediante el Método Cyclic incluido en Delft3D, que se basa en el método ADI (Alternating Direction Implicit).
- Se ha aplicado un filtro Forester horizontal para evitar oscilaciones no físicas en los resultados en una malla con zonas con fuertes gradientes.
- La profundidad umbral utilizada es de $0,1 \text{ m}$.
- La inundación y secado se ha marcado en las caras y en el centro de las celdas.

4.3.5. Resultados hidrodinámicos

Los resultados de la modelización en la malla de detalle con el modelo Delft3D durante el periodo de estudio, han presentado en la zona de vertido del emisario unos valores de velocidad máximos de $0,23$ y $0,18 \text{ m/s}$ en superficie y fondo respectivamente.

En dicha zona, se ha registrado una velocidad media durante el período de simulación de 0,07 y 0,05 m/s en superficie y fondo respectivamente.

En la Figura 4-11 y la Figura 4-12 se muestra, a modo de ejemplo, el campo de velocidades promediadas en profundidad para dos instantes de tiempo diferentes.

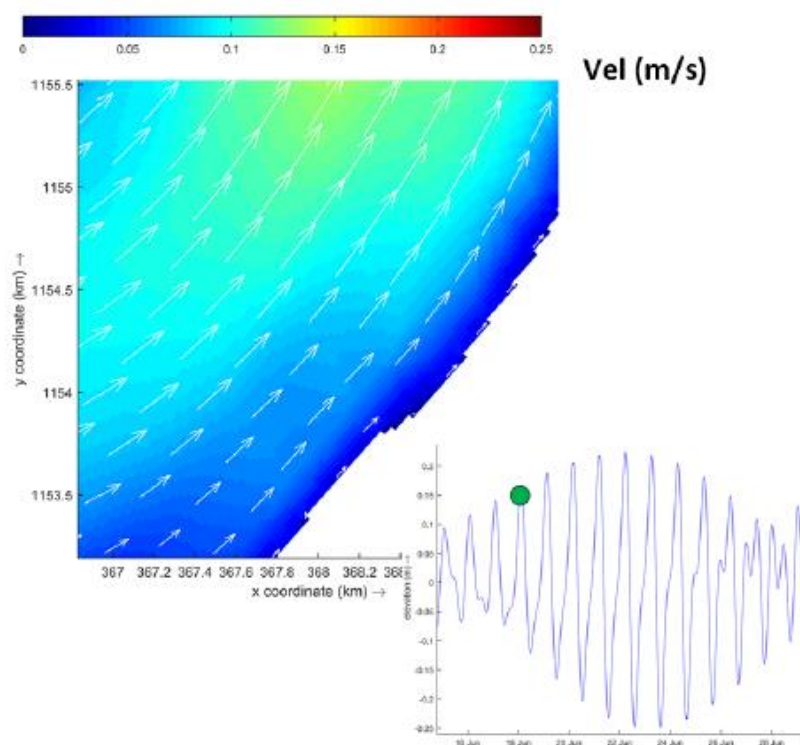


FIGURA 4-11: EJEMPLO DEL CAMPO DE CORRIENTES PROMEDIADAS EN PROFUNDIDAD EN LA ZONA DE ESTUDIO EN UN INSTANTE DEL PERIODO DE SIMULACIÓN CON MAREA LLENANTE.

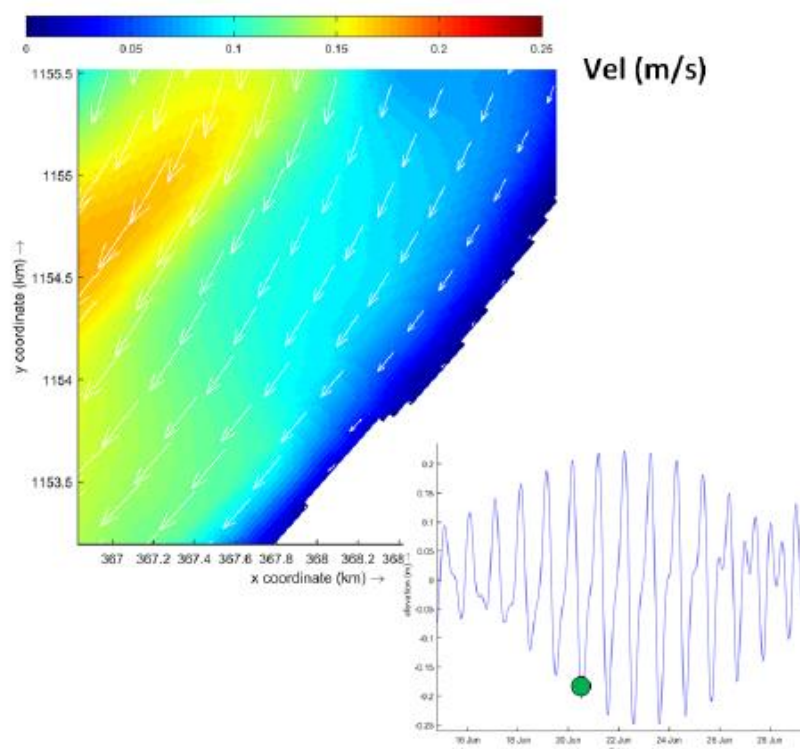


FIGURA 4-12: EJEMPLO DEL CAMPO DE CORRIENTES PROMEDIADAS EN PROFUNDIDAD EN LA ZONA DE ESTUDIO EN UN INSTANTE DEL PERIODO DE SIMULACIÓN CON MAREA VACIANTE.

4.4 Estudio de la contaminación fecal

4.4.4 Introducción

Tras su vertido y mezcla inicial, los efluentes introducidos en el medio receptor se hallan sometidos a fenómenos de advección y dispersión promovidos por la acción de las corrientes. Asimismo, aquellas sustancias o contaminantes susceptibles de sufrir procesos reactivos estarán sometidos a una cinética de inactivación.

Mediante los estudios de transporte del efluente tras su descarga al medio se puede determinar, por un lado, si los contaminantes vertidos pueden alcanzar, bajo ciertas condiciones hidrodinámicas, zonas objeto de protección ambiental y, por otro lado, establecer sus concentraciones en la zona receptora de la descarga.

Para el desarrollo de los estudios de dispersión del vertido se ha empleado el modelo matemático de D-Water Quality, que fue desarrollado por Deltares (<http://oss.deltares.nl/web/delft3d/delwaq>).

4.4.5 Modelos de advección y dispersión

- *Modelo D-Water Quality*

D-Water Quality es el motor de los módulos de calidad de agua y ecología del software Delft3D. Está basado en una extensa librería de procesos y sustancias que pueden ser seleccionados para analizar la calidad de agua y sedimento conjuntamente.

Su librería de procesos cubre una gran parte de aspectos de la calidad del agua y ecología, desde trazadores conservativos, oxígeno disuelto, nutrientes, materia orgánica, materia inorgánica en suspensión, metales pesados, bacterias y microcontaminantes orgánicos a algas complejas.

Resuelve la ecuación de transporte tridimensional para una concentración "c" de una sustancia, mediante el método de volúmenes finitos.

- *Modelo de contaminación bacteriológica*

A partir de los módulos de calidad del agua que se incluyen dentro del sistema D-Water Quality, se ha generado un modelo de procesos de bacterias fecales para simular la evolución de la contaminación bacteriológica (Figura 4-13).

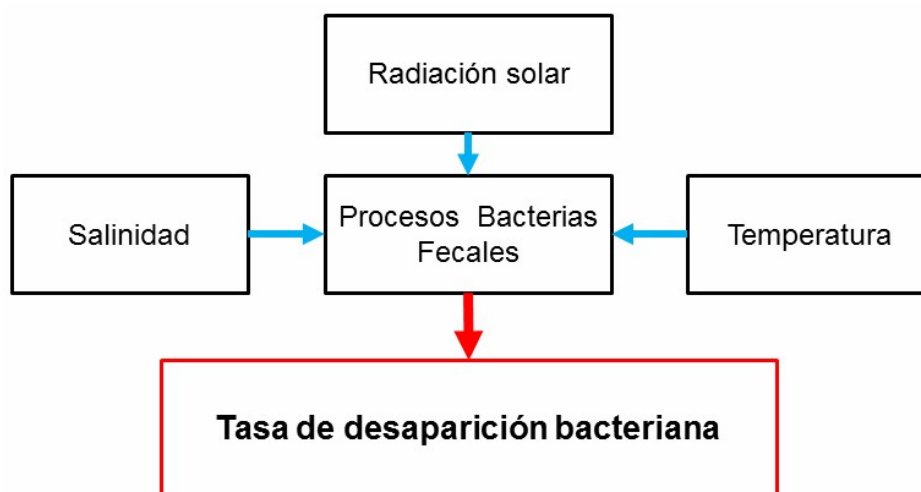


FIGURA 4-13: ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL MODELO DE CONTAMINACIÓN BACTERIOLÓGICA.

La simulación de la contaminación fecal ha asumido las siguientes condiciones:

- Las bacterias fecales están presentes únicamente en la columna de agua y no se acumulan o son resuspendidas desde el sedimento.
- Las bacterias fecales no se reproducen en la columna de agua.
- La mortalidad de las bacterias fecales es dependiente de la temperatura a través

de una cinética de primer orden.

- La tasa de mortalidad aumenta por efectos de la salinidad y la radiación ultravioleta.

4.4.6 Metodología

El estudio de la evolución de la calidad del agua en el medio acuático se ha realizado empleando la herramienta numérica D-Water Quality, utilizada para modelar la evolución de la contaminación fecal.

Se ha analizado el vertido continuo del efluente del emisario submarino del *bypass* EDAR Laguna de Los Patos durante el año 2001.

La contaminación de origen fecal constituye un aspecto crítico en el momento en que son vertidos a una masa de agua efluentes provenientes de agua residual urbana. De acuerdo con la normativa se deben cumplir con los siguientes límites:

- La concentración de bacterias indicadoras de contaminación fecal Coliformes Totales (CT) debe ser menor de 1000 CT/100ml el 90% de una serie de muestras consecutivas (Norma 1 CT) y menor de 5000 CT/100ml en el 10% restante (Norma 2 CT).

- La concentración de bacterias indicadoras de contaminación fecal Coliformes Fecales (CF) debe ser menor de 200 CF/100ml el 90% de una serie de muestras consecutivas (Norma 1 CF) y menor de 400 CF/100ml en el 10% restante (Norma 2 CF).

En concreto, para el modelado de la evolución de la contaminación fecal se ha considerado valores del T90 a las 12 horas del mediodía de 283 min. en el fondo, 94 min. a media profundidad y 72 min. en superficie, obtenido por De Luque *et al.* (2010) en ámbitos costeros del Caribe, concretamente en la bahía de Santa Marta en la costa caribeña de Colombia. Para conseguir estos valores del T90 se han adoptado los siguientes valores de los parámetros del modelo de contaminación fecal:

- El valor de la tasa básica de mortalidad KB ha tomado un valor de 11 d^{-1} que se encuentra dentro del rango de 0,05 y $69,00 \text{ d}^{-1}$ recogido por Trowseillier *et al.* (1998), Kashefipour *et al.* (2002), Sinton *et al.* (2007), Rodrigues *et al.* (2011), Rippy *et al.* (2013) y Liu *et al.* (2015).

- El valor del coeficiente de temperatura de la tasa de mortalidad K_T ha tomado un valor de 1,047 y se encuentra dentro del rango de 1,047 y 1,19 de acuerdo con Chapra (1997) y Kashefipour *et al.* (2006).

- El valor de la tasa de mortalidad dependiente del cloro k_{Cl} ha tomado un valor de $10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ que se encuentra en el rango entre 10^{-5} y $10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ señalado por Deltares (2014).

- El valor del constante de la mortalidad relativa a la radiación k_{rd} ha tomado un valor de $0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{W} \cdot \text{d}^{-1}$ valor dentro del rango de 0,086 y $0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{W} \cdot \text{d}^{-1}$ indicado por Deltares (2014).

- El valor de la fracción de radiación ultravioleta derivada de la luz visible f_{UV} ha tomado un valor de 0,46 que se encuentra comprendida dentro del rango de 0,4 y 0,5 recogido por Thomann and Mueller (1987).

- La temperatura y salinidad del agua varían a lo largo del periodo de cálculo, de acuerdo con los resultados obtenidos del modelado hidrodinámico realizado.

- El coeficiente de extinción de la luz en profundidad se ha considerado constante en la zona de vertido con un valor de $5,6 \text{ m}^{-1}$.

- La nubosidad se ha asumido constante a lo largo del periodo de cálculo, con un valor medio de 4 octavas partes de cielo cubierto.

- El valor adoptado para el coeficiente de dispersión horizontal es de $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$.

Para llevar a cabo el análisis del advección, dispersión e inactivación bacteriana del efluente se han seleccionado una serie de puntos de control distribuidos a lo largo de la playa de San Luis. Éstos se indican esquemáticamente en la Figura 4-14.

En cada uno de estos puntos de control, se han registrado las concentraciones de Coliformes Totales y Fecales obtenidas a través del modelado matemático de la evolución del vertido a través de emisario. Sobre estos resultados se ha aplicado la normativa vigente y se ha analizado la posibilidad de que la contaminación vertida llegue a hacer que se incumplan los criterios ambientales recogidos por el Decreto 883 en la playa de San Luis.



FIGURA 4-14: PUNTOS DE CONTROL SELECCIONADOS PARA EL SEGUIMIENTO DE LA EVOLUCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN FECAL.

4.4.7 Resultados del estudio de evolución de contaminación fecal

Los resultados de la simulación de contaminación fecal han mostrado un cumplimiento de las normas de calidad de aguas de baño establecidas en el Decreto 883 de 11 de octubre de 1995 (Norma 1 CF, Norma 2 CF, Norma 1 CT y Norma 2 CT) durante la totalidad del periodo de simulación, según los registros temporales de contaminación fecal obtenidos en los puntos de control situados a lo largo de la playa de San Luis a través de modelado numérico. En la Figura 4-15, a modo de ejemplo, se muestra la serie temporal de concentración máxima de Coliformes Totales obtenida en el conjunto global de puntos

de control en la playa de San Luis en cada instante del periodo de simulación debido al vertido por emisario del *bypass* de la EDAR Laguna de Los Patos.

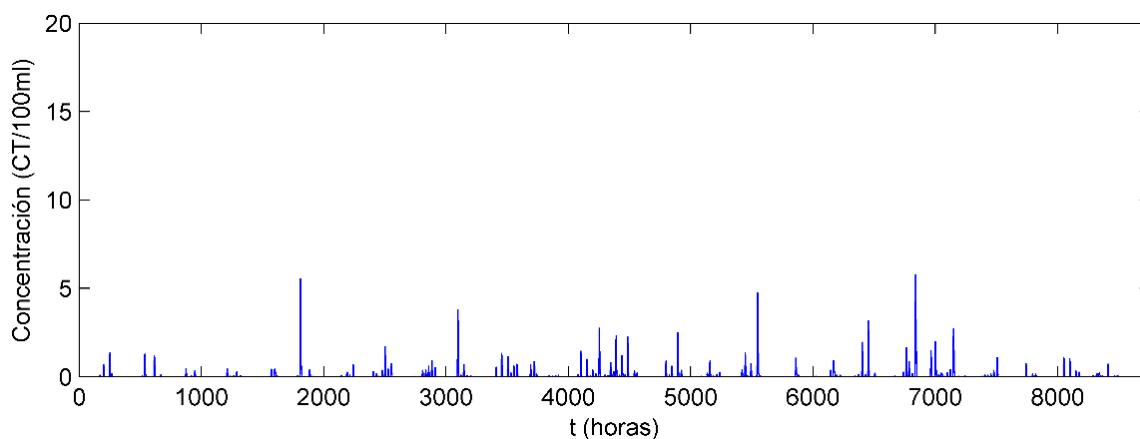


FIGURA 4-15: SERIE TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE COLIFORMES TOTALES (CT/100ML) MÁXIMA REGISTRADA EN LA PLAYA DE SAN LUIS EN CADA INSTANTE DEL PERIODO DE SIMULACIÓN.

Como puede apreciarse en esta Figura 4-15, las concentraciones durante el periodo de simulación nunca alcanzan valores mayores de 10 CT/100ml a lo largo de la playa.

En la Figura 4-16 se recoge, a modo de ejemplo, la distribución espacial de concentración de Coliformes Fecales en la capa superficial (la más restrictiva de acuerdo con los valores de concentración) en cuatro instantes diferentes del periodo de simulación.

DISEÑO DEL SISTEMA DE EVACUACIÓN DE AGUAS DEPURADAS DE LA E.D.A.R.
DE LA LAGUNA DE "LOS PATOS" EN CUMANÁ (VENEZUELA)

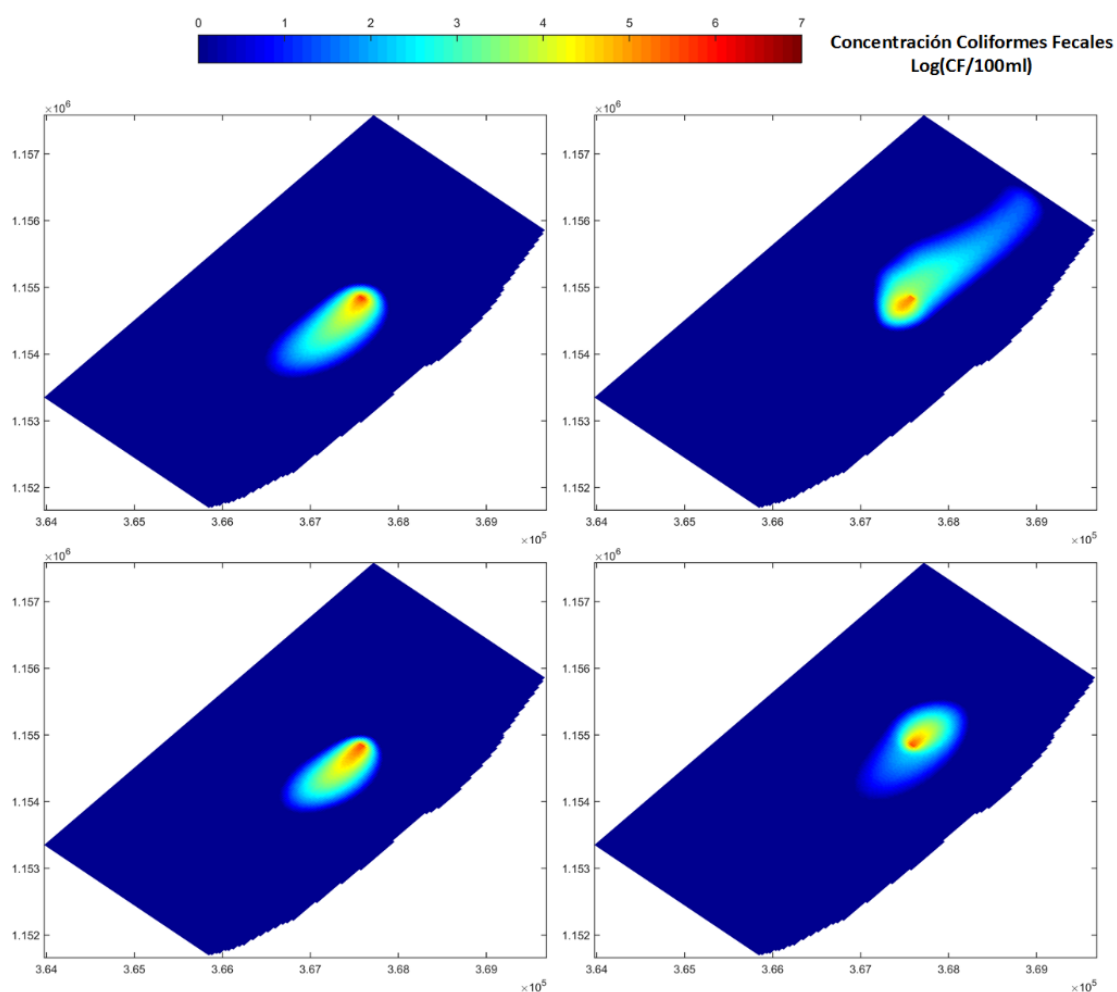


FIGURA 4-16: EJEMPLO DE EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE COLIFORMES FECALES EN LA CAPA SUPERFICIAL EN DIFERENTES INSTANTES DEL PERÍODO DE SIMULACIÓN.

En la Figura 4-16 se observa que, como cabía esperar, los resultados de concentración fecal presentan sus valores más elevados en la zona más próxima a la descarga del emisario, minimizándose su efecto antes de llegar a la playa de San Luis.

5 DISEÑO HIDRÁULICO

5.1 Introducción

Sabiendo que el tramo difusor del emisario deberá situarse a una profundidad mínima de 24 m, se procede a realizar el diseño hidráulico del *bypass*.

En su tramo terrestre el emisario se realizará por comodidad de la obra siguiendo la trazada de la nueva vía de comunicación entre la playa San Luis y la Av. Panamericana la cual tiene un recorrido que llega hasta la costa, aprovechando además que esta iba a ser cementada de nuevo.

El tramo submarino avanzará de manera perpendicular a la batimetría hasta la profundidad mínima de 24m donde se dispondrá el difusor. El tramo submarino se dividirá a su vez en un primer tramo en hinca seguido de un tramo en zanja.

El tramo en hinca debe de continuar hasta que se alcance una profundidad de 15m, donde se calcula que la zona de rompientes no comprometerá la integridad de la obra.

Al final del tramo en zanja estará el tramo difusor, cuyas características para cumplir las condiciones de dilución inicial establecen que dispondrá de 10 elevadores, separados 10 m entre sí y de 1,5 m de altura. Cada uno de estos elevadores terminará con dos bocas de salida en forma de "T".

Los materiales utilizados para los diferentes tramos del emisario serán:

- Para el tramo terrestre se usará el acero, ya que para esta zona es más barato que el hormigón y hay un acceso más fácil al material.
- Para el tramo en hinca del emisario submarino se usará hormigón armado, siendo el exigido por el método constructivo para este tipo de tramo.
- Para el tramo final del emisario submarino, incluido el tramo de difusor, se utilizará el polietileno de alta densidad (PEHD). Este tramo además se colocará en zanja para poder ser asegurado.

La estación de bombeo del sistema se situará junto al actual pretratamiento de la EDAR de Los Patos.

| Tramo | Longitud(m) | Material de las tuberías |
|--|--------------|--------------------------|
| Emisario terrestre | 1.714 | Acero |
| Emisario submarino: tramo en hinca | 766 | Hormigón |
| Emisario submarino: tramo en zanja | 550 | PEHD |
| Emisario submarino: tramo difusor | 90 | PEHD |
| LONGITUD TOTAL (m) | 3.120 | |
| Características del tramo difusor | | |
| Número de elevadores | 10 | |
| Separación entre los elevadores (m) | 10 | |
| Longitud elevadores (m) | 1,5 | |
| Número de boquillas por elevador | 2 | |
| Profundidad mínima en boca (m) | 24 | |

TABLA 6: CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ACTUACIONES.

5.2 Metodología

En la Figura 5-1 se recoge el esquema metodológico adoptado en este estudio para el cálculo de los diámetros de las tuberías de los diferentes tramos del *bypass* y del volumen de regulación de la estación de bombeo.

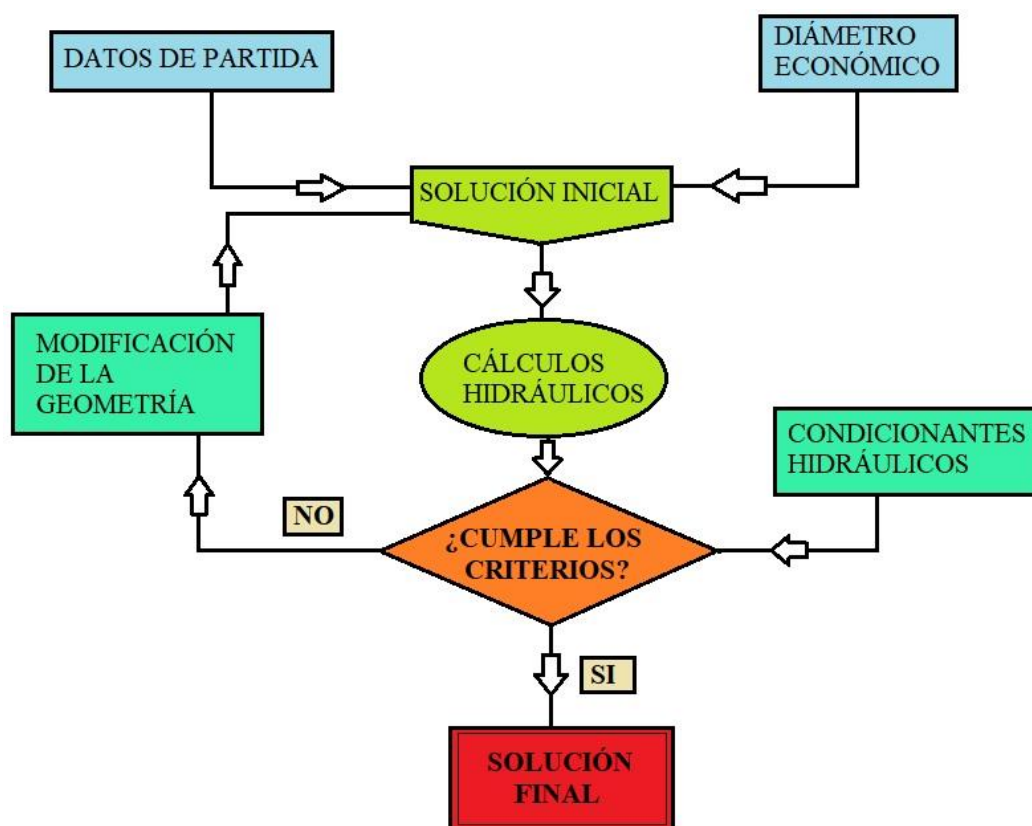


FIGURA 5-1: ESQUEMA METODOLÓGICO DE CÁLCULO HIDRÁULICO.

5.2.1 Cálculo de diámetro económico

Para llevar a cabo un diseño preliminar de las tuberías del sistema de evacuación y reducir la gama de diámetros a considerar en el estudio, es habitual utilizar una fórmula de predimensionamiento que proporcione un diámetro próximo al económico.

Entre las diferentes fórmulas de uso más común, se ha elegido para el prediseño del diámetro de la impulsión la ecuación de *Dacach* (1979) que proporciona un diámetro próximo al económico.

$$D = 0,9 \cdot Q^{0,45}$$

Obteniéndose para un caudal máximo $Q_{\max}=1.700$ l/s un diámetro óptimo de 1.100 mm. Este es el diámetro de partida para los cálculos.

Condicionantes hidráulicos

Para el diseño del conjunto de elementos del sistema de *bypass* de la EDAR Laguna de Los Patos, se han tenido en cuenta los siguientes condicionantes hidráulicos específicos:

- La velocidad mínima admisible en las tuberías se limita a 0,5 m/s y la máxima a 3 m/s, rango considerado aceptable en este tipo de infraestructuras.
- El *bypass* deberá disponer en su inicio una estación de bombeo de agua residual, ya que no se cuenta con la elevación suficiente para que el agua circule por gravedad hasta el mar.
- La cámara de aspiración de la estación de bombeo deberá tener un volumen y características adecuadas para que el número de puestas en marcha y apagado de las bombas no comprometa el correcto funcionamiento del sistema.

5.2.2 Cálculo hidráulico

Para el cálculo de las pérdidas de carga del sistema y del funcionamiento de la estación de bombeo se ha utilizado la herramienta informática EPANET.

EPANET es un programa de ordenador para el análisis de sistemas de distribución de agua potable. Los elementos que utiliza el modelo para simular redes hidráulicas pueden ser de tipo puntual o lineal y se definen a continuación:

- Conexiones o nodos Hidráulicos: Elemento de tipo puntual. Un nodo es un punto singular de la red que puede representar un cambio de diámetro de material, un cruce, cambio de rasante, etc.

- Tuberías: Elemento de tipo lineal. Se definen con los valores de su longitud, su diámetro y el coeficiente de rugosidad. En lo que se refiere a la longitud, ésta es automáticamente calculada con base a la planimetría. También se puede definir el coeficiente de pérdidas.

- Estaciones de Bombeo: Elemento de tipo lineal. Las bombas pueden ser incorporadas ya sea como elementos que aportan un volumen de ingreso al sistema (a la salida de una planta de tratamiento, de un tanque o de un pozo) o como elementos que aumentan la presión en la red. Cada bomba será definida por su curva característica. En el caso de no disponer de la curva característica de la bomba, se estimará una acorde a las características del sistema.

- Depósitos: Elemento de tipo puntual. Los depósitos se definen con su altura total, teniendo en cuenta la variación debida a la densidad del agua marina y la variación debida a los cambios de marea, tomándose siempre el valor mayor para quedarse del lado de la seguridad.

- Pérdidas totales de energía

La pérdida total de energía entre dos nodos consecutivos del sistema de tuberías "i" y "j" se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta h = h_j - h_i = \left[f \frac{L}{D} + \sum K \right] \frac{|Q|Q}{2gA^2}$$

Donde:

- L es la longitud entre los nodos i y j (m).
- D el diámetro interno de la tubería (mm).
- f el factor o coeficiente de fricción de Darcy.
- K el coeficiente de pérdidas localizadas.
- Q el caudal (m³/s).

- A la sección transversal del tubo (m^2)
- g la aceleración de la gravedad.

Coeficiente de fricción de Darcy

Para el cálculo del coeficiente de fricción de Darcy se usan las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\epsilon_r}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad para \quad Re \geq 4.000$$

$$f = \frac{64}{Re} \quad para \quad Re \leq 2.000$$

Donde:

- f es el factor de fricción de Darcy.
- ϵ_r es la rugosidad relativa de la tubería ($\epsilon_r = e/D$).
- e es la rugosidad de la tubería (m)
- D es el diámetro interior de la tubería (m).
- Re el número de Reynolds ($Re = VD/\nu$).
- V es la velocidad media del flujo (m/s) y
- ν es la viscosidad cinemática del fluido (m^2/s)

| Material | ϵ (mm) |
|--------------------|-----------------|
| Fundición | 0,25 |
| Concreto | 0,3-3,0 |
| Hierro Galvanizado | 0,15 |
| Plásticos | 0,0015 |
| Acero | 0,03 |
| Cerámica | 0,3 |

TABLA 7: RUGOSIDADES DE DIFERENTES TIPOS DE MATERIAL.

Para el movimiento intermedio ($2.000 < Re < 4.000$), se asume un valor constante de f igual al correspondiente a $Re=4.000$.

A efectos de este estudio se han utilizado los siguientes valores de rugosidad (Tabla 8).

| Tramo | Material | ϵ (mm) |
|------------------------------------|----------|-----------------|
| Emisario terrestre | Acero | 0,03 |
| Emisario submarino: tramo en hinca | Concreto | 1 |
| Emisario submarino: tramo en zanja | PEHD | 0,0015 |
| Emisario submarino: tramo difusor | PEHD | 0,0015 |

TABLA 8: RUGOSIDADES ADOPTADAS EN LOS DIFERENTES TRAMOS DEL *BYPASS*.

- Coeficiente de pérdidas localizadas

Las pérdidas localizadas o menores del sistema, debidas a los incrementos de turbulencia que se producen en cambios de dirección, codos, accesorios, variaciones de sección, etc., son importantes, en especial en el cálculo hidráulico del tramo difusor del emisario, ya que los elevadores más alejados podrían llegar a tener pérdidas de carga que provocasen velocidades muy bajas provocando sedimentación lo que conduciría a averías de este tramo. Este problema además continuaría extendiéndose y atascando los difusores continuos hasta que finalmente quedasen todos inoperativos.

Como ya se comentó, el programa permite determinar en cada tramo de tubería un coeficiente de pérdidas, siendo el valor de la pérdida el obtenido mediante la siguiente formula:

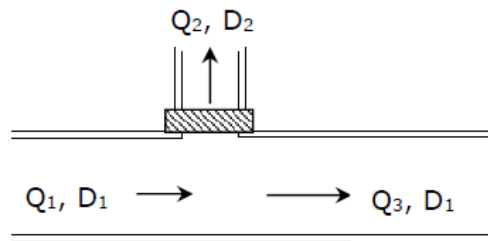
$$h_L = K \frac{|Q|Q}{2gA^2} = K \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

Donde:

- K es el coeficiente de pérdidas menores, v es la velocidad del flujo y g es la aceleración de la gravedad.

La determinación de los coeficientes de pérdidas se realiza mediante el empleo de una serie de expresiones hidráulicas generales para los elementos más comunes, que se exponen a continuación:

- Pérdidas de carga en derivaciones:



$$h_{deriv 2} = K_{Q1-Q2} \left(\frac{V_2^2}{2g} \right)$$

Siendo:

$$K_{Q1-Q2} = 1,2 + (Q_2/Q_1)^{-2} (D_2/D_1)^4 \rightarrow \text{uniones sin redondeo.}$$

$$K_{Q1-Q2} = 0,4 + (Q_2/Q_1)^{-2} (D_2/D_1)^4 \rightarrow \text{uniones con redondeo (por defecto).}$$

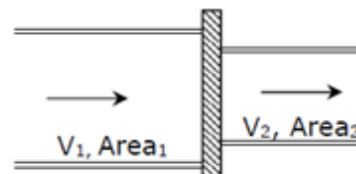
$$h_{deriv 3} = K_{Q1-Q3} \left(\frac{V_3^2}{2g} \right)$$

Siendo:

$$K_{Q1-Q3} = \frac{1 + \left(\frac{Q_3}{Q_1} \right)^{20}}{1 + \left(\frac{Q_3}{Q_1} \right)^{3.5}}$$

- Pérdidas de carga por reducción de diámetro de forma brusca:

$$h_{reduc 1} = K_{reduc 1} \left(\frac{V_2^2}{2g} \right)$$

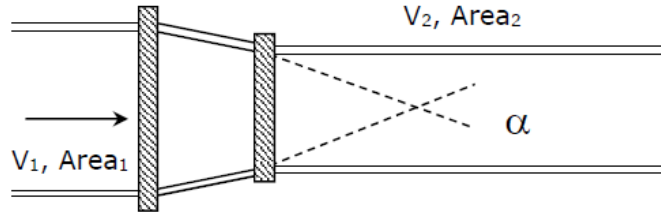


Siendo:

$$K_{reduc 1} = (1/e - 1)^2$$

$$e = 0,57 + 0,043/(1,1 - Area_2/Area_1)$$

- Pérdidas de carga por reducción de diámetro de forma suave:



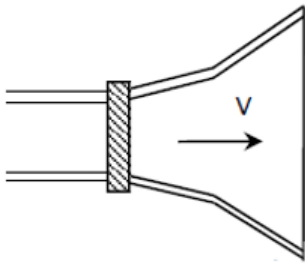
$$h_{\text{reduc } 2} = K_{\text{reduc } 1} K_{\text{reduc } 2} \left(\frac{V_2^2}{2g} \right)$$

Siendo:

$$K_{\text{reduc } 2} = 56,72 \alpha^{-0,007} + 0,01 \alpha - 55,5$$

- Pérdidas en válvulas antirretorno:

Partiendo de la base de que este tipo de pérdidas de carga son orientativas, para su determinación es habitual recurrir a las indicaciones proporcionadas por los fabricantes de estas. En este sentido, para las válvulas de 10" de la serie TF2 se puede hacer uso de las siguientes expresiones:

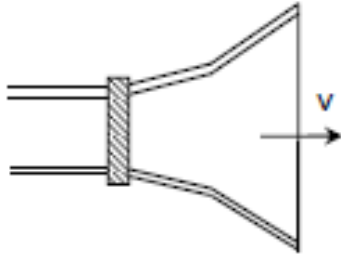


$$h_{\text{antirretorno}} = 0,402 V + 0,383 \rightarrow \text{para 45 metros de contrapresión.}$$

$$h_{\text{antirretorno}} = 0,182 V + 0,183 \rightarrow \text{para 20 metros de contrapresión.}$$

Siendo V la velocidad del flujo (m/s) en el interior de la boquilla, antes de llegar a la citada válvula.

- Pérdida de carga por variación de la velocidad en la salida:



$$h_{salida} = \frac{V^2}{2g}$$

Siendo V el valor de la velocidad del flujo en la sección de salida.

En cuanto a la distribución de los caudales en el tramo difusor de un emisario submarino, así como las pérdidas de carga dependen de su configuración geométrica – diámetros de la tubería principal, diámetros de los tubos elevadores y diámetros de las boquillas de salida. El objeto principal del diseño hidráulico del tramo difusor es asegurar su óptimo funcionamiento, que básicamente se resume con los siguientes requisitos:

- Asegurar velocidades de no sedimentación en todos los tramos del emisario para los caudales más frecuentes o bien velocidades apropiadas para la limpieza en caso de no ser evitable la sedimentación en la situación de normal explotación.
- Asegurar una distribución uniforme de los caudales en cada uno de los tubos elevadores y de las boquillas para todo el abanico de caudales que estén previstos a circular por el emisario.
- Limitar las pérdidas de carga en el emisario para los caudales máximos previstos a circular en los márgenes de la presión disponible en cabeza del emisario.

Para cumplir con los requisitos mencionados, en ocasiones, es necesario disminuir paulatinamente el diámetro de la tubería en el tramo difusor en la dirección del flujo junto con el aumento del diámetro de los tubos elevadores y las boquillas con el fin de mantener una velocidad del flujo constante a lo largo del todo el tramo difusor.

5.3 Dimensionamiento del emisario

Tras el cálculo hidráulico de velocidades y pérdidas de carga a lo largo del sistema de Emisario (terrestre y submarino) a continuación se recogen los diámetros de los colectores en los correspondientes tramos. Ver Tabla 9.

| Tramo | Longitud(m) | Material | Diámetro interior (mm) |
|-------------------------------------|-------------|----------|------------------------|
| Emisario terrestre | 1.714 | Acero | 1.000 |
| Emisario submarino: tramo en hincas | 766 | Hormigón | 1.000 |
| Emisario submarino: tramo en zanja | 550 | PEHD | 923 |
| Emisario submarino: tramo difusor | 90 | PEHD | 923 |
| LONGITUD TOTAL (m) | 3.120 | | |

TABLA 9: CARACTERÍSTICAS DE LOS TRAMOS DEL EMISARIO PROPUESTOS.

En la Tabla 10 se indican las características del tramo difusor propuesto.

| Características del tramo difusor | |
|---|-----|
| Número de elevadores | 10 |
| Separación entre los elevadores (m) | 10 |
| Longitud elevadores (m) | 1,5 |
| Diámetro interior elevadores (mm) | 300 |
| Número de boquillas por elevador | 2 |
| Diámetro interior de las boquillas (mm) | 200 |

TABLA 10: CARACTERÍSTICAS DEL TRAMO DIFUSOR PROPUESTO.

Los diámetros de los emisarios resultan algo inferiores al óptimo económico, dado que con dicho diámetro (1.100 mm) no se puede asegurar el cumplimiento de las velocidades mínimas en caudales bajos.

En el apéndice adjunto de este documento se detallan los resultados del cálculo hidráulico de caudales, velocidades y pérdidas de carga para esta solución, en las 2 situaciones de caudales siguientes:

- Escenario 1: que corresponde a un caudal circulando por el sistema de 436 l/s (situación de funcionamiento normal en el año horizonte de diseño).
- Escenario 2: caudal de 1.700 l/s, correspondiente a una situación de emergencia.

A modo de resumen de dichos resultados, en la Tabla 11 se recogen las velocidades obtenidas en los diferentes escenarios de cálculo, donde se puede comprobar el cumplimiento de los objetivos planteados en lo referente a velocidades mínimas (0,5 m/s) y máximas (3 m/s).

| Tramo | Diámetro (mm) | Esc. 1 (436 l/s) | Esc. 2 (1.700 l/s) |
|------------------------|---------------|------------------|--------------------|
| Emisario terrestre | 1.000 | 0,56 | 2,16 |
| Emisario sub. en hinca | 1.000 | 0,54 | 2,16 |
| Emisario sub. en PEHD | 923 | 0,65 | 2,54 |

TABLA 11: DIÁMETROS Y VELOCIDADES (M/S) DEL FLUJO DEL EMISARIO EN LOS DOS ESCENARIOS DE CÁLCULO CONSIDERADOS.

En la Figura 5-2 se muestran los caudales en los elevadores del tramo difusor para los 2 escenarios de funcionamiento considerados.

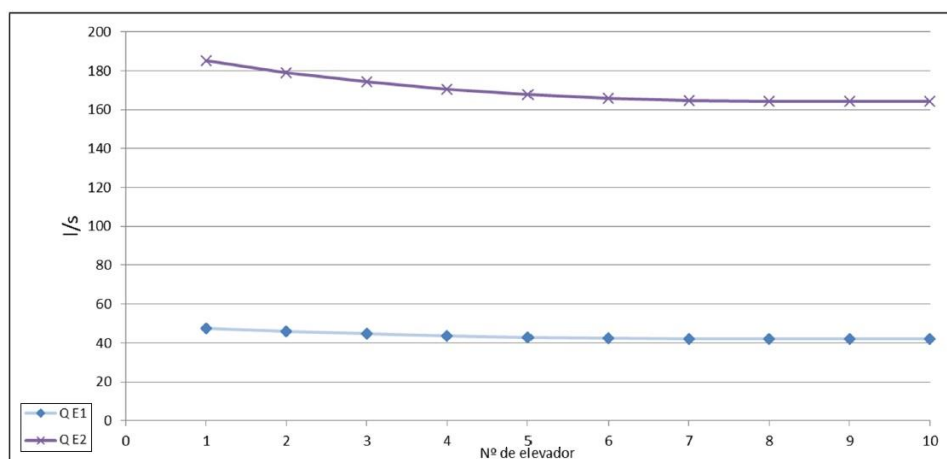


FIGURA 5-2: CAUDALES (L/S) EN LOS ELEVADORES EN LOS 2 ESCENARIOS.

En la Figura 5-3 se muestran las velocidades en los elevadores. Como puede observarse también se mantienen en el rango deseado entre los 0,5 y 3 m/s.

DISEÑO DEL SISTEMA DE EVACUACIÓN DE AGUAS DEPURADAS DE LA E.D.A.R.
DE LA LAGUNA DE "LOS PATOS" EN CUMANÁ (VENEZUELA)

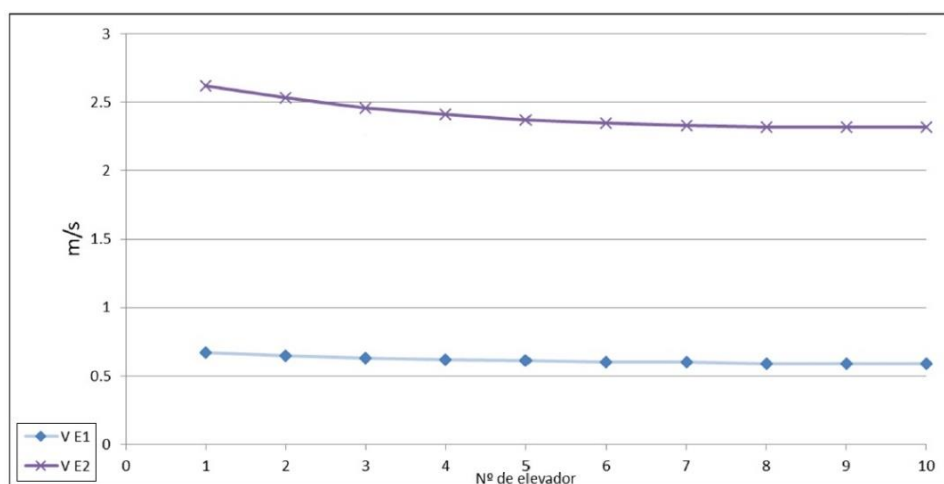


FIGURA 5-3: VELOCIDADES (M/S) EN LOS ELEVADORES EN LOS 2 ESCENARIOS.

A continuación, se muestran en la Figura 5-4 y en la Figura 5-5, los resultados de los caudales y velocidades, respectivamente, en cada boquilla de salida.

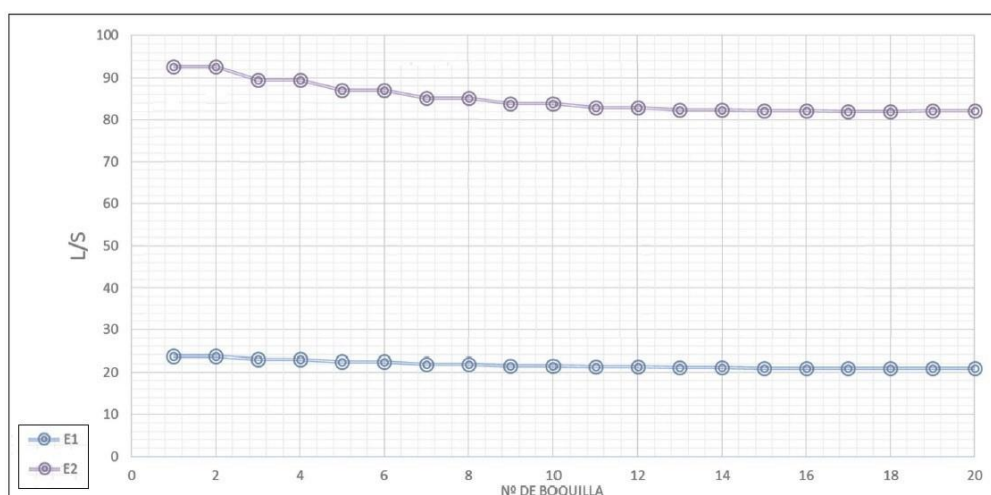


FIGURA 5-4: CAUDALES (L/s) DE SALIDA EN LAS BOQUILLAS EN LOS 2 ESCENARIOS.

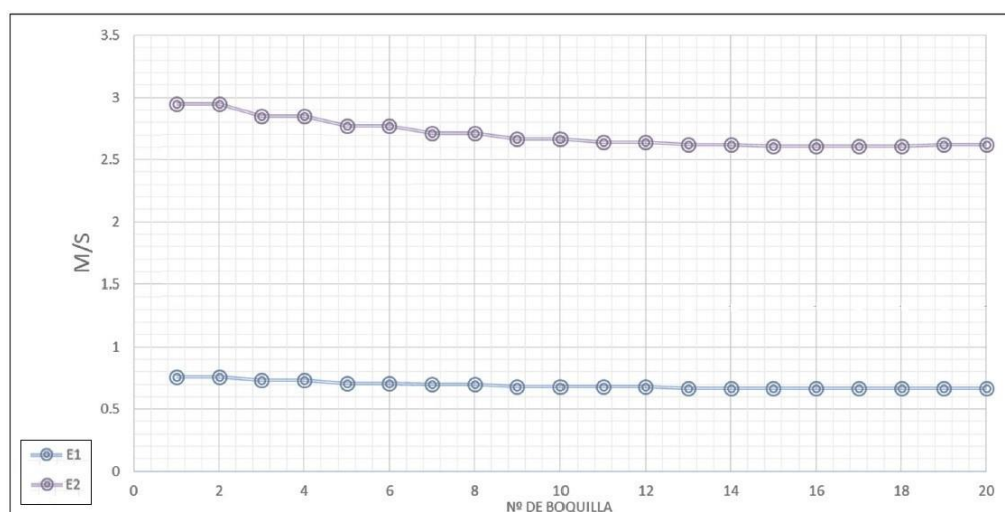


FIGURA 5-5: VELOCIDADES (M/S) DE SALIDA EN LAS BOQUILLAS EN LOS 2 ESCENARIOS.

Como se puede apreciar en las Figura 5-2, Figura 5-3, Figura 5-4 y Figura 5-5, la distribución de caudales y velocidades en los tubos elevadores y las boquillas resultan sensiblemente uniformes y aseguran el funcionamiento óptimo de estos elementos del tramo difusor, por lo que no se necesitan cambios en los diámetros de los tubos elevadores y en las boquillas. Sin embargo, de la *Tabla 16: Resultados de los cálculos hidráulicos para el sistema diseñado* se puede apreciar que la velocidad en la tubería del difusor en los últimos dos tramos es inferior de 0.50m/s para caudal máximo y en los últimos 7 tramos para el caudal del escenario 1. Estas velocidades son bajas y existen posibilidades de que se produzcan sedimentaciones en los últimos tramos de la tubería del difusor incluso para caudales máximos, por lo que sería necesario reducir el diámetro de la tubería del difusor en los últimos tramos o aumentar los diámetros de los tubos elevadores y las boquillas en estos tramos. Por facilidad constructiva es preferible hacer lo segundo frente a lo primero. Otra posibilidad sería asegurar periódicamente caudales altos de limpieza, lo que supondría aumentar la capacidad de bombeo para asegurar estos caudales. No obstante, estos cálculos exceden el alcance de este trabajo y no han sido realizados.

Por último, en la siguiente Tabla 12 se resumen las pedidas de carga en los principales tramos del *bypass* para los dos escenarios de funcionamiento analizados:

| Tramo | Longitud | Esc. 1 (436 l/s) | Esc. 2 (1.700 l/s) |
|------------------------|----------|---------------------|-----------------------|
| Emisario terrestre | 1.714 m | 0,36 | 4,61 |
| Emisario sub. en hincá | 766 m | 0,24 | 3,61 |
| Emisario sub. en PEHD | 550 m | 0,18 | 2,22 |
| Tramo difusor | 90 m | 0,16 | 2,33 |
| Salinidad | | 0,62 | 0,62 |
| Pérdidas totales | | 1,56 | 13,39 |

TABLA 12: PERDIDAS DE CARGA.

5.4 Dimensionamiento de la estación de bombeo.

La estación de bombeo de inicio del *bypass* consta de los siguientes elementos principales:

- Una cámara de aspiración cuyo volumen de regulación debe ser adecuado para limitar el número de arranques y paradas de las bombas.
- Una cámara seca donde se sitúan las bombas en serie.
- Un aliviadero de seguridad por el que evacuar los caudales en caso de avería.
- Un conjunto de bombas cuyo funcionamiento pueda adaptarse a la variabilidad de los caudales que llegan a la estación.
- Una cámara de carga desde la que se produce el vertido del efluente por el emisario. Esta cámara sirve de conexión hidráulica entre el bombeo y el emisario cuando la descarga es por bombeo, y entre la cámara de aspiración y el emisario cuando la descarga es por gravedad.
- Una tubería *bypass* que conecta la cámara de aspiración con la cámara de carga para realizar el vertido por gravedad. Esta tubería está provista de una válvula antirretorno en la cámara de carga que sirve para cerrar el *bypass* cuando la descarga hacia el emisario se produce por bombeo.

La estación de bombeo se sitúa junto al pretratamiento actual de la EDAR, en una zona donde el terreno alcanza una cota media de +4,80 m. La cámara de aspiración recibe los caudales previamente tratados en la EDAR, a través de un aliviadero cuyo labio de vertido se sitúa a la cota +4,02 m.

A la vista de estas cotas y de las pérdidas de carga calculadas en el apartado anterior, se puede concluir que la estación dispone de una cota suficiente para evacuar por gravedad parte de los caudales que recibe.

A continuación, se recogen los cálculos hidráulicos realizados para el dimensionamiento de la cámara de aspiración, de la cámara seca y del aliviadero de seguridad. Asimismo, se define el modo de funcionamiento del sistema, estableciéndose qué caudales podrían evacuarse por gravedad y las características generales de las bombas necesarias para evacuar caudales superiores.

Para realizar estos cálculos y para la definición de las dimensiones de la propia estación de bombeo, se han considerado una serie de bombas reales que podrían ser utilizadas en este caso. No obstante, tanto las características de las bombas elegidas como el modo de funcionamiento de la estación de bombeo deben considerarse como orientativos, y tendrán que ser definidos de forma más precisa en fases posteriores de ingeniería de detalle.

5.4.1 Cámara de aspiración

El volumen de almacenamiento de la cámara de aspiración o pozo de bombeo depende del tipo y características de las bombas, en especial del caudal que son capaces de bombear y de su potencia. Dicho volumen debe de ser suficiente para evitar que los ciclos de funcionamiento sean demasiado cortos, lo cual supondría una frecuencia elevada de arranques y paradas y, en consecuencia, un rápido deterioro de las bombas.

Para el cálculo del volumen de la cámara de aspiración se ha utilizado la formulación propuesta en Metcalf & Eddy (1985):

$$V = \frac{t \cdot q}{4}$$

Donde:

- V es la capacidad necesaria (m³).

- t es el tiempo mínimo en minutos de un ciclo de bombeo (tiempo entre arranques sucesivos o cambios de velocidad en bombas de velocidad variable). Depende de la potencia de la bomba (Tabla 13).

| Potencia de la bomba P (kW) | t (min) |
|-----------------------------|-----------------------|
| P<15 | 10 (se recomienda 15) |
| 15<P<75 | 15 |
| 75<P< 200 | 20-30 |
| P>200 | Consultar fabricante |

TABLA 13: VALORES ORIENTATIVOS DEL TIEMPO MÍNIMO DEL CICLO DE BOMBEO.

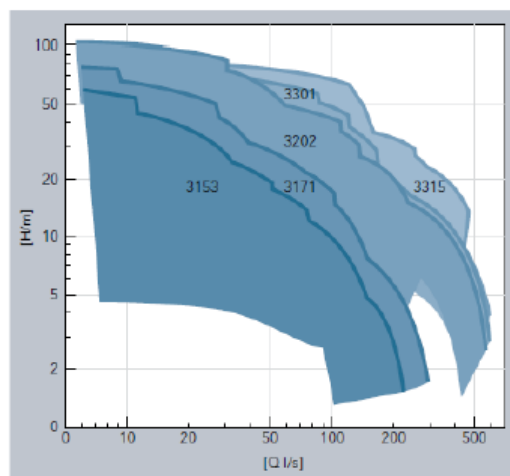
- q es la capacidad de la bomba en m^3/min o incremento de la capacidad cuando una bomba se encuentra en funcionamiento y arranca una segunda o cuando aumenta la velocidad del motor, en el caso de bombas de velocidad variable.

Esta expresión permite calcular el volumen de la cámara entre los puntos de arranque y parada de una bomba. El volumen total se obtendrá sumando el correspondiente a cada una de las bombas de que se disponga. Por tanto, para determinar dicho volumen se debe definir a priori las características de las bombas previstas en la estación.

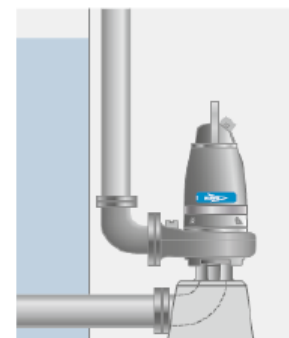
De acuerdo con los caudales y pérdidas de energía calculados anteriormente, y únicamente a efectos de cálculo, se toman cuatro bombas de la marca comercial Flygt, modelo 3356 NT, cuyas características generales son las siguientes (Figura 5-6):

- 2 bombas de 50 kW y 350 mm de diámetro con $Q = 500 \text{ l/s}$ y altura 10 m.
- 2 bombas de 75 kW y 350 mm de diámetro con $Q = 500 \text{ l/s}$ y altura 15 m.

Rendimiento, 50 Hz



NT



Instalación vertical permanente en pozo seco, o en línea, con conexión embridada a tuberías de aspiración y descarga.

Potencias y tamaños

| Modelo | 3153 | 3171 | 3202 | 3301 | 3315 |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Potencia, kW | 7.5-15 | 15-22 | 22-47 | 37-70 | 55-105 |
| Descarga, mm (pulg.) | 80 (3") | 100 (4") | 100 (4") | 150 (6") | 150 (6") |
| | 100 (4") | 150 (6") | 150 (6") | 250 (10") | 250 (10") |
| | 150 (6") | 250 (10") | 200 (8") | 300 (12") | 300 (12") |
| | 200 (8") | | 300 (12") | 350 (14") | 350 (14") |
| | 250 (10") | | | | |

FIGURA 5-6: CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA MARCA FLYGT MODELO 3356 NT.

Aplicando la formulación anterior y con un tiempo entre arranques de 15 min (recomendado en Metcalf & Eddy, 1985, para bombas de entre 15 y 75 KW) se ha obtenido un volumen de la cámara de aspiración de 450 m³.

5.4.2 Cámara seca

En las estaciones de bombeo convencionales, la cámara seca se encuentra situada adyacente a la de aspiración y alberga las bombas y el conjunto de tuberías de aspiración e impulsión y sus correspondientes válvulas.

A lo largo de la pared de separación de las cámaras debe haber un canal de drenaje para recoger y transportar hasta un sumidero las pérdidas que puedan producirse, así como el agua procedente del drenaje de las bombas y el de limpieza de la cámara seca. La solera de la cámara seca debe tener pendiente hacia el canal de drenaje y el sumidero (10mm/m).

Debe disponer de una escalera de acceso de rigidez y resistencia a la corrosión suficientes.

Para el dimensionamiento de la cámara seca se han utilizado los valores que figuran en la Tabla 14, que son aplicables tanto al caso de cámara seca como húmeda, donde q_1 es el caudal de cada una de las bombas. De la aplicación de estos criterios a las características de las bombas propuestas, resultan las dimensiones mínimas que se muestran en la Figura 5-7, que deben considerarse orientativas.

| Cota | Valor mínimo recomendado (m) |
|----------|------------------------------|
| A | 3,62 |
| B | 2,00 |
| C | 0,80 |
| G | 0,20 |
| H | 0,20 |

TABLA 14: VALORES PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LA CÁMARA SECA DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO.

| Dimensiones recomendadas para pozo de planta rectangular, q_1 en l/s | | |
|--|---|------------------------------------|
| Cota | Descripción | Valor recomendado |
| A (mm), mínimo | Distancia entre ejes de bombas y entrada de agua | $A \text{ (mm)} = 162 q_1^{0,5}$ |
| B (mm), mínimo | Distancia entre ejes de bombas contiguas | $B \text{ (mm)} = 70 q_1^{0,5}$ |
| C (mm), máximo | Distancia entre eje de bomba a muro más próximo | $C \text{ (mm)} = 34 q_1^{0,5}$ |
| D (mm) | Lado del hueco de comunicación | $D \text{ (mm)} = 22 q_1^{0,5}$ |
| E (mm) | Distancia entre entrada de agua y pantalla deflectora | $E \text{ (mm)} = 304 q_1^{0,28}$ |
| F (mm), mínimo | Nivel de agua | $F \text{ (mm)} = 178 q_1^{0,274}$ |
| G (mm) | Distancia entre volutas contiguas | Mínimo 200 mm |
| H (mm) | Distancia entre muro y voluta extrema | Mínimo 200 mm |

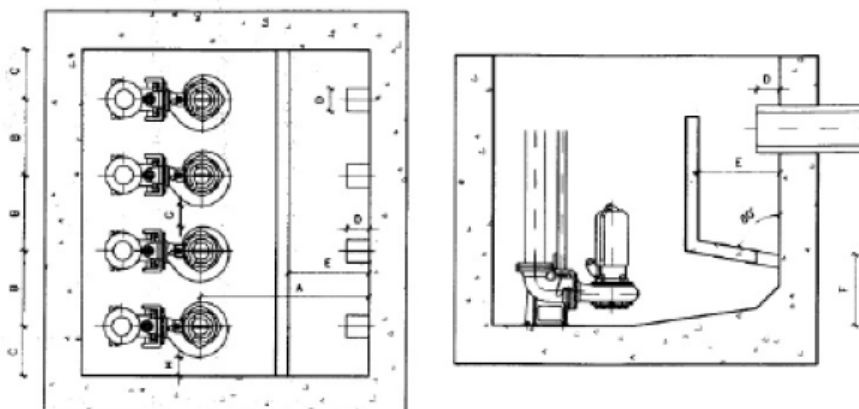


FIGURA 5-7: DIMENSIONES RECOMENDADAS PARA UN POZO DE PLANTA RECTANGULAR.

5.4.3 Aliviadero de seguridad

La cámara de aspiración debe contar con un aliviadero de seguridad de capacidad suficiente para evacuar los caudales máximos que pueden llegar a la planta, que en este caso ascienden a 1.700 l/s.

Para calcular la longitud del labio de vertido se fija la altura máxima de la lámina de agua sobre el labio de vertido a un valor de 0,5 m, y se aplica la ecuación siguiente correspondiente a un vertedero rectangular de pared delgada con contracción lateral:

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} b_e h_e^{\frac{3}{2}}$$

Donde:

- Q es el caudal vertido (m^3/s).

- C_d es el coeficiente de desagüe (adimensional).
- b_e es la longitud del labio de vertido (m).
- h_e es la altura de la lámina de agua sobre el vertedero (m) y
- g es la aceleración de la gravedad (m/s^2).

Tomando un coeficiente de desagüe, del lado de la seguridad, de $C_d=0,6$, la longitud mínima del labio de vertido resulta ser de 2,8 m, para evacuar el caudal máximo que llega a la estación de bombeo.

La cota máxima a la que puede situarse el labio del vertedero, para no afectar a la línea de agua del pretratamiento, es la $C= +4,02-0,50= +3,52$.

5.4.4 Bombas y funcionamiento de la estación.

A continuación, se trata de establecer un modo de funcionamiento orientativo de la estación de bombeo acorde con el volumen de regulación disponible, la cota del labio de vertido, los caudales para evacuar y las alturas de energía necesarias para ello.

En primer lugar, de acuerdo con lo mencionado anteriormente, el nivel de agua en la cámara de aspiración podría alcanzar la cota +3,52 metros. No obstante, para evitar reboses accidentales, es conveniente reducir dicho nivel máximo. Por ello se establece el nivel máximo del agua en la cámara de aspiración en la cota +3,00m.

Para el caudal correspondiente al escenario de funcionamiento normal futuro (436 l/s), la pérdida de carga total del sistema de *bypass* alcanza 1,56 m. Situando el punto de arranque de las bombas en la cota +1,76 m se podría evacuar por gravedad dicho caudal, incluso en condiciones de marea alta. De esta manera se asegura que, en la situación de mejora de la red de saneamiento, no sería necesario utilizar el sistema de bombeo en condiciones de funcionamiento normal.

Además, dado que se dispone de cota suficiente, se podría evacuar por gravedad un caudal máximo de 675 l/s, correspondiente a la cota +3,00m de la lámina de agua en la cámara de aspiración.

La cámara de carga tiene dos niveles característicos - cota 1,76 cota máxima de funcionamiento por gravedad con la que se pueden evacuar 436 l/s a máxima marea considerada (+0,20) y cota 13,59 máxima de bombeo que coincide con la cota del aliviadero de emergencia. Con esta cota se evacuan los 1.700,00 l/s máximos previstos

para el emisario. El funcionamiento por gravedad se asegura con la tubería "by pass" provista con una válvula antirretorno en la cámara de carga. Cuando con nivel 1,76 arrancan las bombas en la cámara de carga se establece un nivel superior que en la cámara de aspiración por lo que la válvula antirretorno cierra la tubería del *bypass*. Esta situación se mantiene hasta que el nivel en la cámara de aspiración llega a cota 0,00 cuando se paran las bombas y empieza la descarga por gravedad. La cámara de carga podrá tener una superficie en planta no superior de 10 m², aunque las superficies de la cámara de aspiración y de la cámara de carga han de hallarse bajo una hipótesis de funcionamiento real en el que se busca el funcionamiento óptimo de las bombas – principalmente menor número de arranques y paradas.

Los caudales característicos de bombeo propuestos oscilarán en función del nivel de agua en la cámara de aspiración. Este nivel variará a su vez en función del agua que bruta que llegue. Las bombas deberán programarse de forma que su encendido y apagado sea automático y sean capaces de elevar el agua deseada. Si se fija un nivel de parada de bombas en la cota cero (Figura 5-8), el volumen de regulación de la cámara de aspiración (450 m³) se alcanza con una superficie en planta de esta de 150 m², valor compatible con la superficie de terreno disponible.

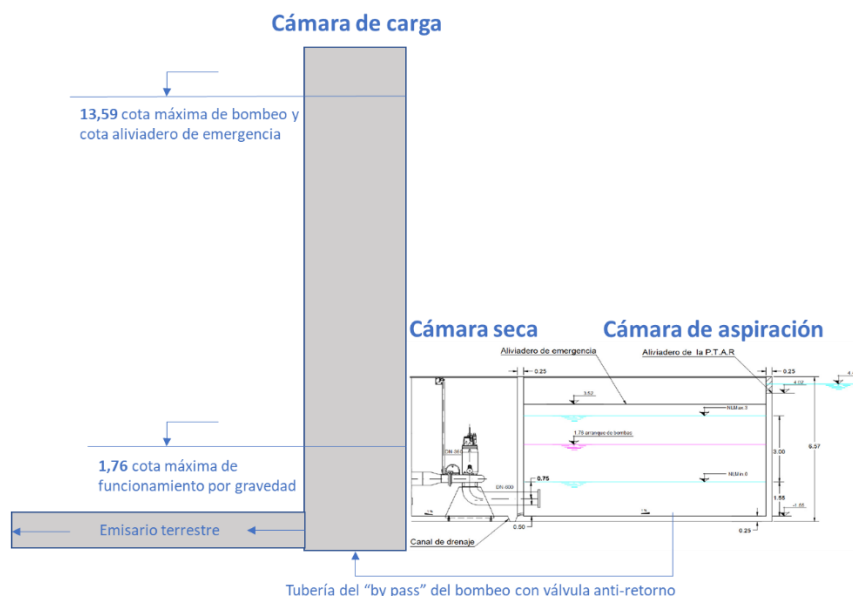


FIGURA 5-8: SECCIÓN DE CÁMARA DE ASPIRACIÓN, ESTACIÓN DE BOMBEO Y CÁMARA DE CARGA. NIVELES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE FUNCIONAMIENTO.

En la Tabla 15 los caudales de bombeo en función de las bombas encendidas y del nivel de agua en la cámara de aspiración: cota 0 mínimo y cota +3 máximo obteniéndose un rango de caudales que oscila entre 675 l/s hasta 1.821 l/s que cumple con las condiciones iniciales de diseño.

| Numero de bombas | Pozo a cota 0 Q (l/s) | Pozo a cota 0 H (m) | Pozo a cota +3 Q (l/s) | Pozo a cota +3 H (m) |
|---------------------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 1 bomba de 50 | 675 | 2,98 | 723 | 0,28 |
| 2 bombas de 50 | 1.179 | 7,12 | 1.271 | 5,10 |
| 2 bombas de 50 + 1 bomba de 75 | 1.499 | 10,84 | 1.632 | 9,63 |
| 2 bombas de 50 + 2 bomba de 75 | 1.674 | 13,22 | 1.821 | 12,42 |

TABLA 15: CAUDALES DISEÑO DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO.

Se tendrá por lo tanto para nuestros escenarios el siguiente modo de funcionamiento.

-Escenario 1 (436 l/s): 1 bomba de 50Kw

-Escenario 2 (1700 l/s): 2 bombas de 50Kw + 2 bombas de 75Kw.

6 RESUMEN Y CONCLUSIÓN

6.1 Resumen

En el presente documento se ha realizado un estudio para el diseño de un *bypass* de la EDAR de la Laguna de Los Patos en Cumaná, Venezuela, para evacuar los caudales excedentes de esta, con el fin de solventar la problemática existente en la zona.

Los principales problemas originados son:

- La eutrofización de la Laguna de los Patos
- Calidad del agua amenazada de la zona costera.

El *bypass* se compone de los siguientes elementos:

- Una estación de bombeo junto al pretratamiento de la EDAR, que recoge los excedentes de dicha planta.
- Un emisario terrestre a lo largo de la margen norte de la Laguna de los Patos, desde la estación de bombeo hasta el arranque del emisario submarino.
- Un emisario submarino que dispone de difusores en el tramo final.

El estudio se divide en parte Ambiental, para definir las características del tramo difusor con lo que se pretende asegurar la calidad del agua en la zona de baño, y parte Hidráulica, para determinar los diámetros y longitudes de tubería necesarios para el emisario y las características de la estación de bombeo.

- En el apartado Ambiental, se ha realizado un estudio en continuo del vertido evacuado al medio marino por el emisario. Esto se ha realizado utilizando la información de corrientes, niveles, salinidades y temperatura, obtenida con el modelo Delft3D, se ha analizado la dilución inicial en continuo durante un año del vertido del emisario empleando las formulaciones de Roberts 2004-2006.

Los resultados obtenidos del modelado de la dilución inicial se han introducido como condición de contorno para el modelo D-Water Quality para analizar la dispersión de la contaminación de origen fecal.

Los resultados obtenidos son:

- Obtención de un valor de dilución mínimo por encima de 100, significando un cumplimiento de los requisitos establecidos utilizando el caudal máximo de diseño (1700 l/s) y condiciones ambientales del lado de la seguridad (medio en reposo)

-El análisis de la contaminación de origen fecal (Coliformes Fecales y Totales) de acuerdo con las normas de calidad de aguas de baño ha mostrado el cumplimiento de estas durante todo el periodo de simulación analizado.

- En el apartado Hidráulico, para el cálculo de cada tramo del emisario se han utilizado criterios de optimización económica e hidráulica. En primer lugar, se ha realizado un predimensionamiento que proporcione un diámetro próximo al económico, reduciendo la gama de diámetros a considerar en el estudio; y en segundo lugar, se ha realizado con la aplicación EPANET el cálculo de velocidades y pérdidas de carga del sistema para cada caudal de diseño, con el fin de comprobar que se limitan las velocidades máximas a 3 m/s para reducir las pérdidas de carga, y se aseguran unas velocidades mínimas de 0,5 m/s para evitar problemas de sedimentación. Las características de los tramos de emisario y difusor se pueden ver en forma detallada en la Tabla 9 y Tabla 10, de las que cabe destacar que la longitud del emisario es de 3.120 metros (1.714 terrestre, 766 en hinca y 550 en zanja submarina) y el del tramo difusor es de 90 metros con un total 10 elevadores con 2 boquillas por elevador.

Las características de la Estación de bombeo son las siguientes:

- Una cámara de aspiración cuyo volumen de regulación debe ser adecuado para limitar el número de arranques y paradas de las bombas.
- Una cámara seca donde se sitúan las bombas en serie.
- Un aliviadero de seguridad por el que evacuar los caudales en caso de avería.
- Un conjunto de bombas, 2 bombas de 50Kw + 2 bombas de 75Kw, cuyo funcionamiento pueda adaptarse a la variabilidad de los caudales que llegan a la estación.
- Una cámara de carga desde que se produce el vertido del efluente por el emisario. Esta cámara sirve de conexión hidráulica entre el bombeo y el emisario cuando la descarga es por bombeo, y entre la cámara de aspiración y el emisario cuando la descarga es por gravedad.

6.2 Conclusión

El diseño ambiental e hidráulico realizado con este Trabajo Fin de Grado (TFG) del SISTEMA DE EVACUACIÓN DE AGUAS DEPURADAS DE LA E.D.A.R. DE LA LAGUNA DE “LOS PATOS” EN CUMANÁ (VENEZUELA) propone una solución factible de la problemática ambiental y sanitaria surgida en la zona, que desde punto de vista ambiental cumple con la normativa vigente y desde punto de vista hidráulico garantiza un funcionamiento óptimo del sistema.

APÉNDICE

En la tabla siguiente se muestran los resultados de los cálculos hidráulicos para el sistema diseñado. El esquema y la localización de los elementos se aclara en la **¡Error!**
No se encuentra el origen de la referencia..

| <u>ESC. 1</u> | Nodo1 | Nodo2 | Pérdida de Carga por UD (m/km) | Velocidad (m/s) | Caudal (l/s) | Factor de Fricción DW | Pérdida de Carga (m) |
|---------------------------|--------------|--------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Emisario Principal | Cu_0 | Cu_1 | 0,21 | 0,56 | 436 | 0,0134 | 0,36 |
| | Cu_1 | Cu_2 | 0,32 | 0,56 | 436 | 0,020177 | 0,24 |
| | Cu_2 | INI_e1 | 0,33 | 0,65 | 436 | 0,0128 | 0,18 |
| | INI_e1 | INI_e2 | 1,37 | 0,58 | 388,32 | 0,013066 | 0,01 |
| | INI_e2 | INI_e3 | 1,07 | 0,51 | 342,28 | 0,013366 | 0,01 |
| | INI_e3 | INI_e4 | 0,82 | 0,44 | 297,55 | 0,013712 | 0,01 |
| | INI_e4 | INI_e5 | 0,6 | 0,38 | 253,82 | 0,01412 | 0,01 |
| | INI_e5 | INI_e6 | 0,43 | 0,32 | 210,82 | 0,01462 | 0,01 |
| | INI_e6 | INI_e7 | 0,29 | 0,25 | 168,33 | 0,015262 | 0,01 |
| | INI_e7 | INI_e8 | 0,18 | 0,19 | 126,13 | 0,016148 | 0,01 |
| | INI_e8 | INI_e9 | 0,09 | 0,13 | 84,08 | 0,017526 | 0,01 |
| | INI_e9 | INI_e10 | 0,02 | 0,06 | 42,06 | 0,020309 | 0,01 |
| Elevadores | INI_e1 | FIN_e1 | 32,29 | 0,67 | 47,67 | 0,015703 | 0,05 |
| | INI_e2 | FIN_e2 | 27,91 | 0,65 | 46,04 | 0,01581 | 0,04 |
| | INI_e3 | FIN_e3 | 24,47 | 0,63 | 44,74 | 0,015899 | 0,04 |
| | INI_e4 | FIN_e4 | 21,81 | 0,62 | 43,73 | 0,01597 | 0,03 |
| | INI_e5 | FIN_e5 | 19,77 | 0,61 | 43 | 0,016023 | 0,03 |
| | INI_e6 | FIN_e6 | 18,22 | 0,6 | 42,5 | 0,016059 | 0,03 |
| | INI_e7 | FIN_e7 | 17,08 | 0,6 | 42,2 | 0,016082 | 0,03 |
| | INI_e8 | FIN_e8 | 16,28 | 0,59 | 42,05 | 0,016093 | 0,02 |
| | INI_e9 | FIN_e9 | 15,77 | 0,59 | 42,02 | 0,016095 | 0,02 |
| | INI_e10 | FIN_e10 | 15,5 | 0,59 | 42,06 | 0,016092 | 0,02 |

DISEÑO DEL SISTEMA DE EVACUACIÓN DE AGUAS DEPURADAS DE LA E.D.A.R.
DE LA LAGUNA DE "LOS PATOS" EN CUMANÁ (VENEZUELA)

| | | | | | | | |
|-----------|---------|--------|--------|------|-------|----------|------|
| Boquillas | FIN_e1 | Boq_1 | 426,07 | 0,76 | 23,84 | 0,016635 | 0,11 |
| | FIN_e1 | Boq_2 | 426,07 | 0,76 | 23,84 | 0,016635 | 0,11 |
| | FIN_e2 | Boq_3 | 397,4 | 0,73 | 23,02 | 0,01675 | 0,1 |
| | FIN_e2 | Boq_4 | 397,4 | 0,73 | 23,02 | 0,01675 | 0,1 |
| | FIN_e3 | Boq_5 | 375,2 | 0,71 | 22,37 | 0,016847 | 0,09 |
| | FIN_e3 | Boq_6 | 375,2 | 0,71 | 22,37 | 0,016847 | 0,09 |
| | FIN_e4 | Boq_7 | 358,51 | 0,7 | 21,86 | 0,016924 | 0,09 |
| | FIN_e4 | Boq_8 | 358,51 | 0,7 | 21,86 | 0,016924 | 0,09 |
| | FIN_e5 | Boq_9 | 346,58 | 0,68 | 21,5 | 0,016982 | 0,09 |
| | FIN_e5 | Boq_10 | 346,58 | 0,68 | 21,5 | 0,016982 | 0,09 |
| | FIN_e6 | Boq_11 | 338,6 | 0,68 | 21,25 | 0,017021 | 0,08 |
| | FIN_e6 | Boq_12 | 338,6 | 0,68 | 21,25 | 0,017021 | 0,08 |
| | FIN_e7 | Boq_13 | 333,82 | 0,67 | 21,1 | 0,017046 | 0,08 |
| | FIN_e7 | Boq_14 | 333,82 | 0,67 | 21,1 | 0,017046 | 0,08 |
| | FIN_e8 | Boq_15 | 331,54 | 0,67 | 21,03 | 0,017057 | 0,08 |
| | FIN_e8 | Boq_16 | 331,54 | 0,67 | 21,03 | 0,017057 | 0,08 |
| | FIN_e9 | Boq_17 | 331,06 | 0,67 | 21,01 | 0,01706 | 0,08 |
| | FIN_e9 | Boq_18 | 331,06 | 0,67 | 21,01 | 0,01706 | 0,08 |
| | FIN_e10 | Boq_19 | 331,64 | 0,67 | 21,03 | 0,017057 | 0,08 |
| | FIN_e10 | Boq_20 | 331,64 | 0,67 | 21,03 | 0,017057 | 0,08 |

ESC. 2

| | Nodo1 | Nodo2 | Pérdida de Carga por UD (m/km) | Velocidad (m/s) | Caudal (l/s) | Factor de Fricción DW | Pérdida de Carga (m) |
|--------------------|--------|---------|--------------------------------|-----------------|--------------|-----------------------|----------------------|
| Emisario Principal | Cu_0 | Cu_1 | 2,69 | 2,16 | 1700 | 0,011242 | 4,61 |
| | Cu_1 | Cu_2 | 4,72 | 2,16 | 1700 | 0,01977 | 3,61 |
| | Cu_2 | INI_e1 | 4,04 | 2,54 | 1700,01 | 0,010207 | 2,22 |
| | INI_e1 | INI_e2 | 20,16 | 2,26 | 1514,84 | 0,010393 | 0,2 |
| | INI_e2 | INI_e3 | 15,68 | 2 | 1335,79 | 0,010602 | 0,16 |
| | INI_e3 | INI_e4 | 11,96 | 1,74 | 1161,62 | 0,010842 | 0,12 |
| | INI_e4 | INI_e5 | 8,86 | 1,48 | 991,19 | 0,011126 | 0,09 |
| | INI_e5 | INI_e6 | 6,32 | 1,23 | 823,47 | 0,011473 | 0,06 |
| | INI_e6 | INI_e7 | 4,26 | 0,98 | 657,59 | 0,011917 | 0,04 |
| | INI_e7 | INI_e8 | 2,6 | 0,74 | 492,8 | 0,012527 | 0,03 |
| | INI_e8 | INI_e9 | 1,31 | 0,49 | 328,52 | 0,013466 | 0,01 |
| | INI_e9 | INI_e10 | 0,36 | 0,25 | 164,34 | 0,015333 | 0 |

| | | | | | | | |
|------------|---------|---------|--------|------|-------|----------|------|
| Elevadores | INI_e1 | FIN_e1 | 136,94 | 1,39 | 98,41 | 0,013711 | 0,21 |
| | INI_e2 | FIN_e2 | 118,45 | 1,35 | 95,11 | 0,013796 | 0,18 |
| | INI_e3 | FIN_e3 | 103,97 | 1,31 | 92,47 | 0,013866 | 0,16 |
| | INI_e4 | FIN_e4 | 92,74 | 1,28 | 90,44 | 0,013922 | 0,14 |
| | INI_e5 | FIN_e5 | 84,1 | 1,26 | 88,97 | 0,013964 | 0,13 |
| | INI_e6 | FIN_e6 | 77,55 | 1,24 | 87,98 | 0,013993 | 0,12 |
| | INI_e7 | FIN_e7 | 72,72 | 1,24 | 87,38 | 0,01401 | 0,11 |
| | INI_e8 | FIN_e8 | 69,3 | 1,23 | 87,09 | 0,014019 | 0,1 |
| | INI_e9 | FIN_e9 | 67,1 | 1,23 | 87,04 | 0,01402 | 0,1 |
| | INI_e10 | FIN_e10 | 65,99 | 1,23 | 87,12 | 0,014018 | 0,1 |

DISEÑO DEL SISTEMA DE EVACUACIÓN DE AGUAS DEPURADAS DE LA E.D.A.R.
DE LA LAGUNA DE "LOS PATOS" EN CUMANÁ (VENEZUELA)

| | | | | | | | |
|-----------|---------|--------|---------|------|-------|----------|------|
| Boquillas | FIN_e1 | Boq_1 | 1814,06 | 1,57 | 49,2 | 0,014479 | 0,45 |
| | FIN_e1 | Boq_2 | 1814,06 | 1,57 | 49,2 | 0,014479 | 0,45 |
| | FIN_e2 | Boq_3 | 1694,4 | 1,51 | 47,55 | 0,014571 | 0,42 |
| | FIN_e2 | Boq_4 | 1694,4 | 1,51 | 47,55 | 0,014571 | 0,42 |
| | FIN_e3 | Boq_5 | 1601,89 | 1,47 | 46,24 | 0,014647 | 0,4 |
| | FIN_e3 | Boq_6 | 1601,89 | 1,47 | 46,24 | 0,014647 | 0,4 |
| | FIN_e4 | Boq_7 | 1532,43 | 1,44 | 45,22 | 0,014707 | 0,38 |
| | FIN_e4 | Boq_8 | 1532,43 | 1,44 | 45,22 | 0,014707 | 0,38 |
| | FIN_e5 | Boq_9 | 1482,94 | 1,42 | 44,49 | 0,014752 | 0,37 |
| | FIN_e5 | Boq_10 | 1482,94 | 1,42 | 44,49 | 0,014752 | 0,37 |
| | FIN_e6 | Boq_11 | 1449,95 | 1,4 | 43,99 | 0,014783 | 0,36 |
| | FIN_e6 | Boq_12 | 1449,95 | 1,4 | 43,99 | 0,014783 | 0,36 |
| | FIN_e7 | Boq_13 | 1430,29 | 1,39 | 43,69 | 0,014802 | 0,36 |
| | FIN_e7 | Boq_14 | 1430,29 | 1,39 | 43,69 | 0,014802 | 0,36 |
| | FIN_e8 | Boq_15 | 1421 | 1,39 | 43,55 | 0,014811 | 0,36 |
| | FIN_e8 | Boq_16 | 1421 | 1,39 | 43,55 | 0,014811 | 0,36 |
| | FIN_e9 | Boq_17 | 1419,23 | 1,39 | 43,52 | 0,014813 | 0,35 |
| | FIN_e9 | Boq_18 | 1419,23 | 1,39 | 43,52 | 0,014813 | 0,35 |
| | FIN_e10 | Boq_19 | 1421,83 | 1,39 | 43,56 | 0,01481 | 0,36 |
| | FIN_e10 | Boq_20 | 1421,83 | 1,39 | 43,56 | 0,01481 | 0,36 |
| | | | | | | | |

TABLA 16: RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS HIDRÁULICOS PARA EL SISTEMA DISEÑADO

DISEÑO DEL SISTEMA DE EVACUACIÓN DE AGUAS DEPURADAS DE LA E.D.A.R.
DE LA LAGUNA DE "LOS PATOS" EN CUMANÁ (VENEZUELA)

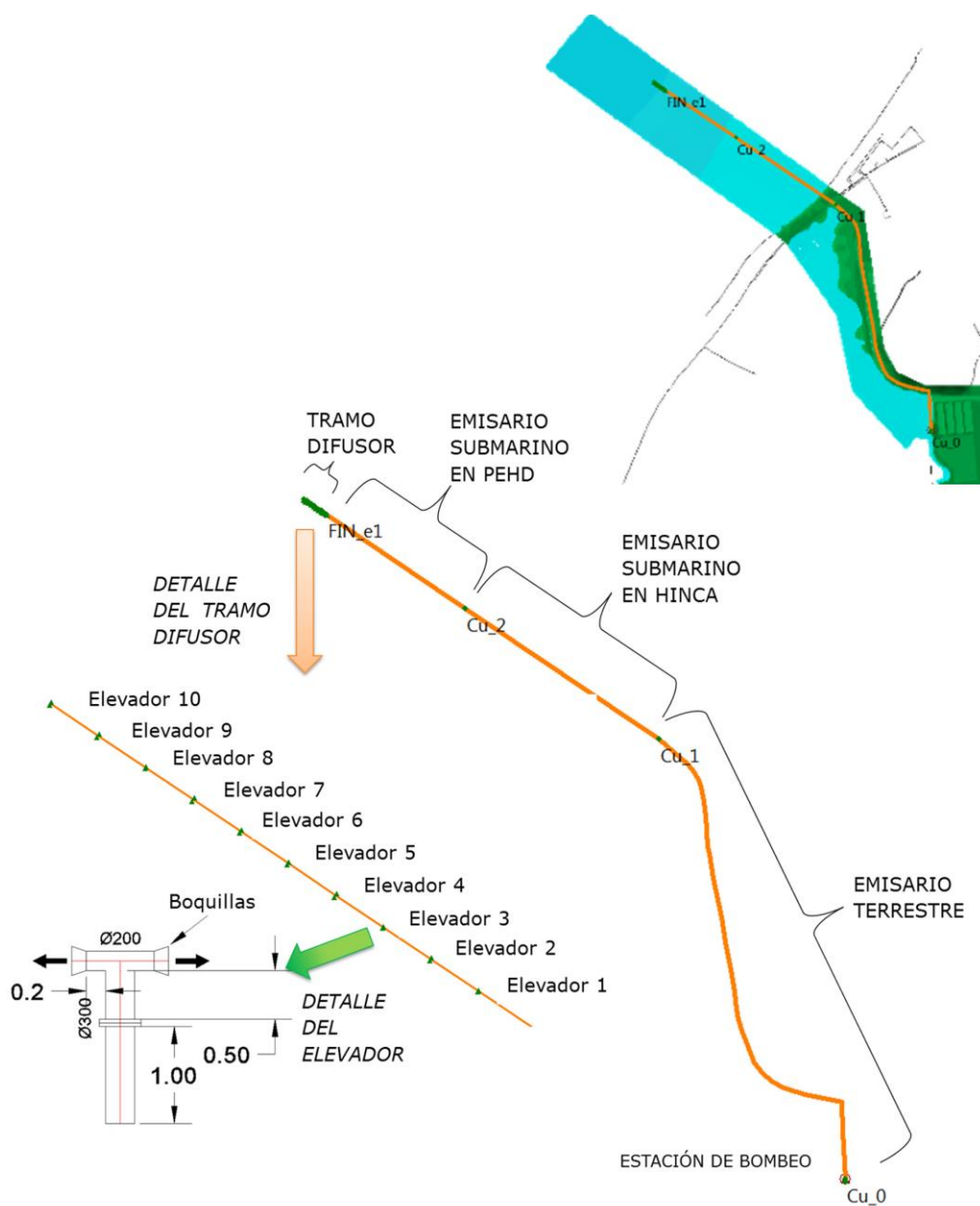


FIGURA A-1: ESQUEMA Y LOCALIZACIÓN DE ELEMENTOS.

**DISEÑO DEL SISTEMA DE EVACUACIÓN DE AGUAS DEPURADAS DE LA E.D.A.R.
DE LA LAGUNA DE “LOS PATOS” EN CUMANÁ (VENEZUELA)**

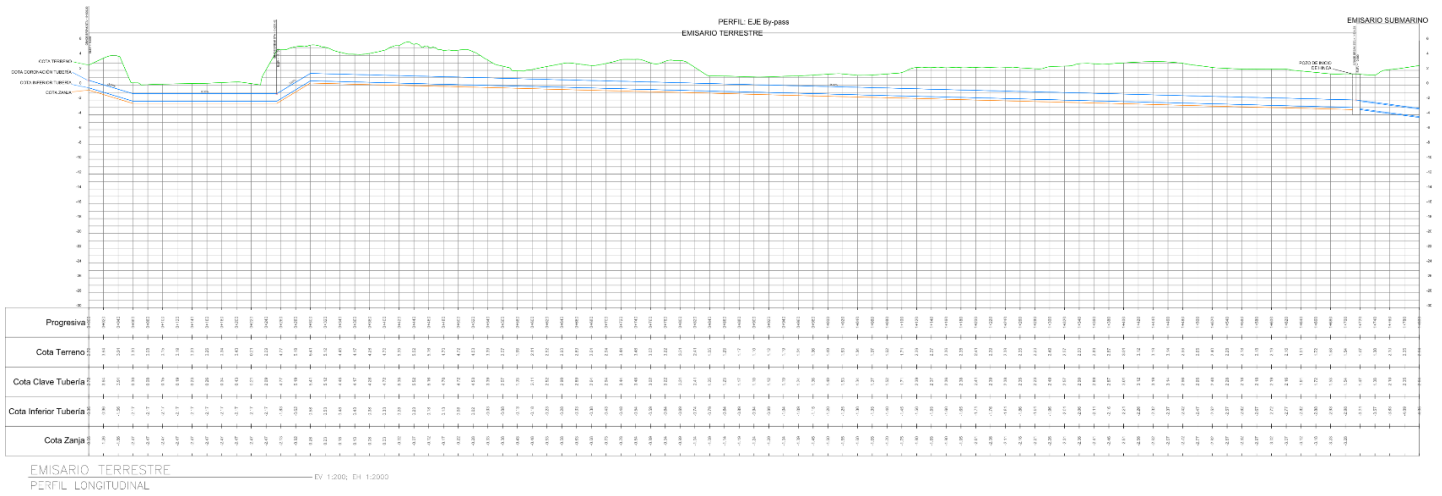


FIGURA A-2: PERFIL LONGITUDINAL DEL EMISARIO TERRESTRE

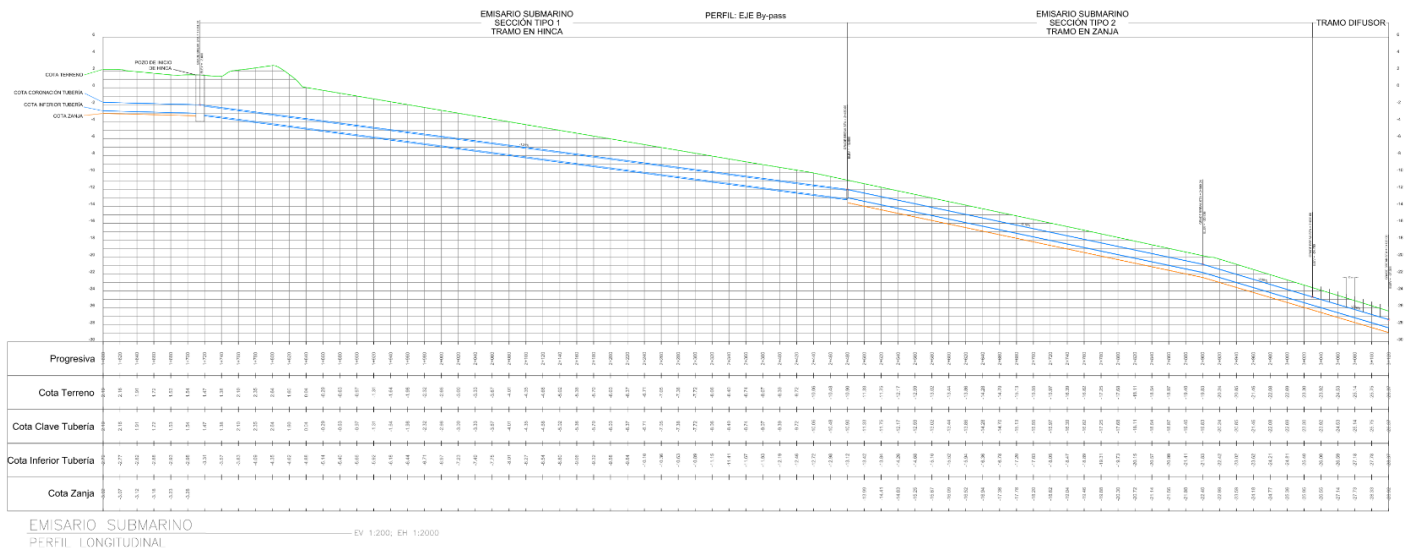
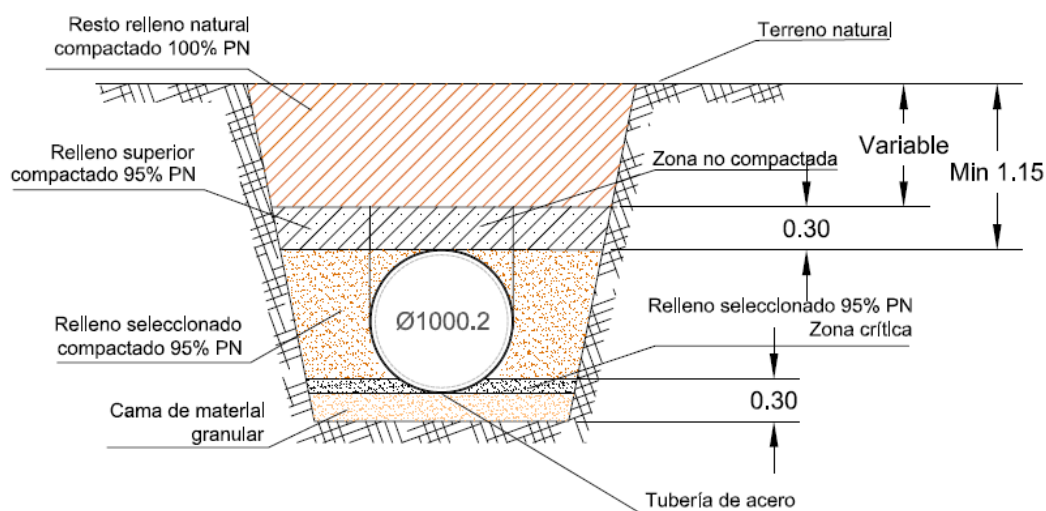


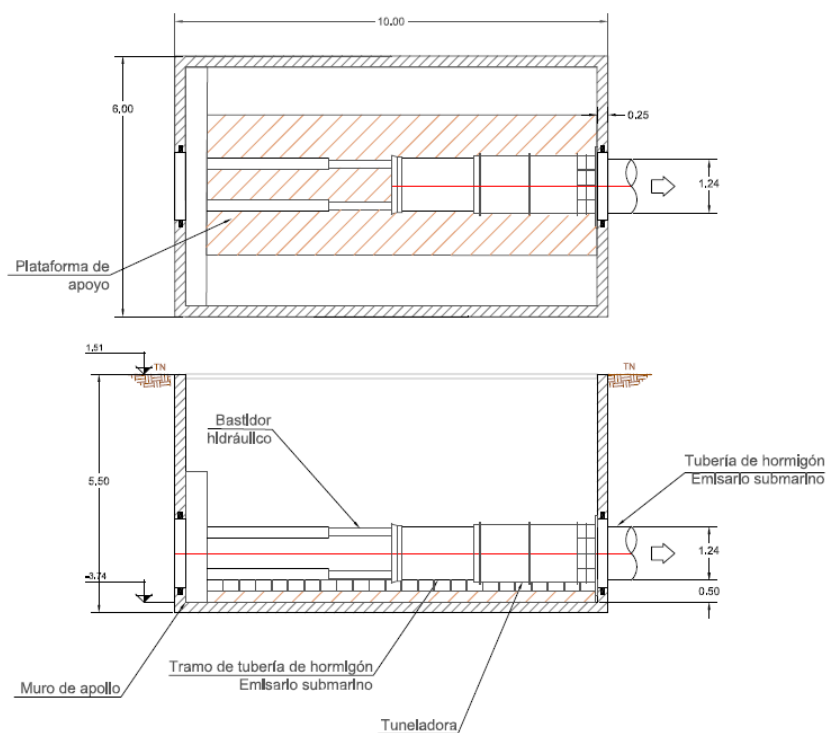
FIGURA A-3: PERFIL LONGITUDINAL DEL EMISARIO SUBMARINO

DISEÑO DEL SISTEMA DE EVACUACIÓN DE AGUAS DEPURADAS DE LA E.D.A.R. DE LA LAGUNA DE "LOS PATOS" EN CUMANÁ (VENEZUELA)

EMISARIO TERRESTRE SECCIÓN TIPO

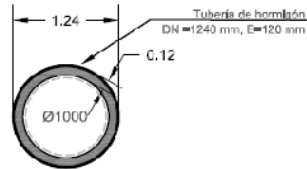


POZO DE INICIO
DE HINCA

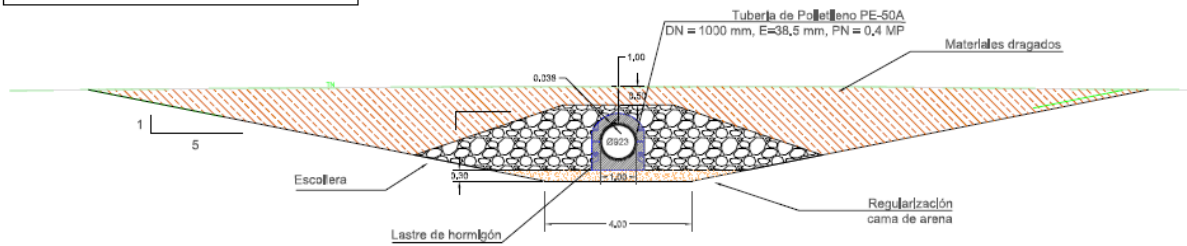


DISEÑO DEL SISTEMA DE EVACUACIÓN DE AGUAS DEPURADAS DE LA E.D.A.R.
DE LA LAGUNA DE "LOS PATOS" EN CUMANÁ (VENEZUELA)

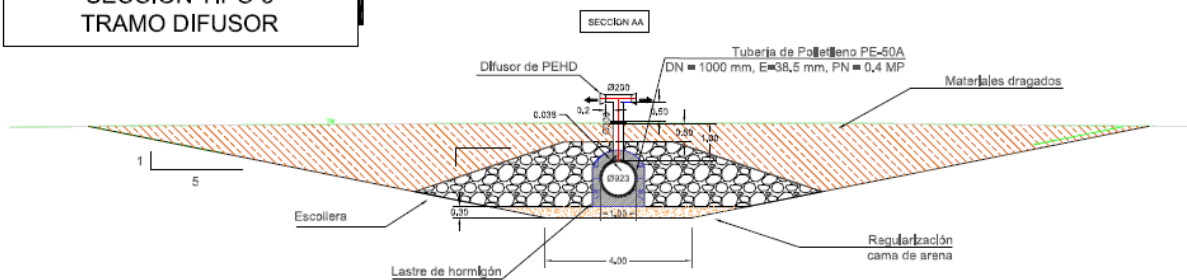
SECCIÓN TIPO 1
TRAMO EN HINCA



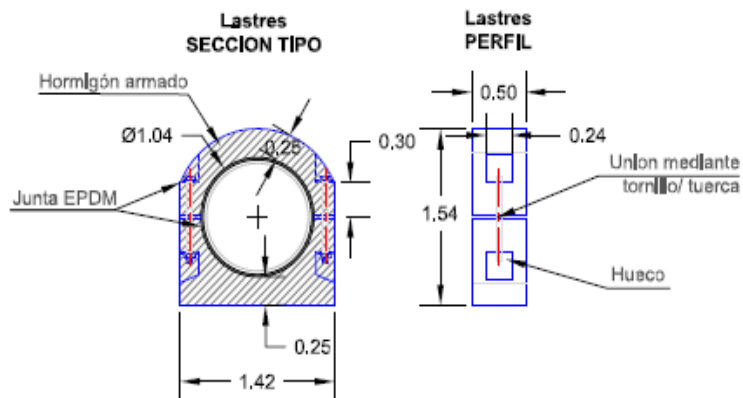
SECCIÓN TIPO 2
TRAMO EN ZANJA



SECCIÓN TIPO 3
TRAMO DIFUSOR



DETALLE DE LASTRE



DETALLE DE DIFUSOR

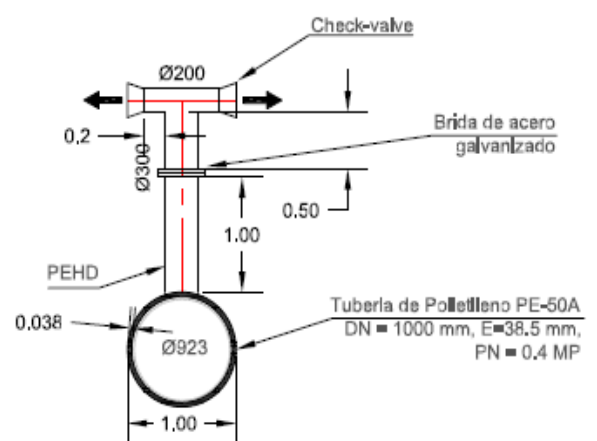


FIGURA A-4: SECCIONES TIPO DE LOS EMISARIOS TERRESTRE Y SUBMARINO